



دانشگاه صنعتی شهرود

دانشکده عمران و معماری

رساله دکتری

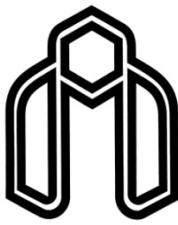
کنترل لرزه‌ای سازه‌ها در معرض زلزله‌های حوزه نزدیک با استفاده از میراگر باز تنظیم شونده

سید مسعود سجادی آل‌هاشم

استاد راهنمای:

دکتر علی کیهانی

اللهُ الرَّحْمَنُ الرَّحِيمُ



دانشگاه صنعتی شهرود

دانشکده عمران و معماری
گروه عمران

کنترل لرزه‌ای سازه‌ها در معرض زلزله‌های حوزه نزدیک با استفاده از میراگر باز تنظیم شونده

دانشجو: سید مسعود سجادی آل‌هاشم

استاد راهنما:
دکتر علی کیهانی

رساله جهت اخذ درجه دکتری

شهریور ۱۳۹۱

شماره: سانچ
تاریخ: ۱۳۹۱/۰۶/۲۳
ویرایش:



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۱۱

بسمه تعالیٰ

صور تجلیسه دفاع از رساله دکتری (ph.D)

بدینوسیله گواهی می شود آقای سید مسعود سجادی آل هاشم دانشجوی دکتری رشته عمران گرایش سازه ورودی سال

۱۳۸۵ در تاریخ ۹۱/۶/۲۳ از رساله خود با عنوان: کنترل لرزه ای سازه ها در معرض زلزله های حوزه نزدیک دفاع و با

اخذ نمره ۱۹/۲۰ به درجه: عالی نائل گردید.

الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰ ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹

ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹-۱۶/۹۹ د) غیر قابل فبول و نیاز به دفاع مجدد دارد

ذ) رساله نیاز به اصلاحات دارد

ردیف	هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱	دکتر علی کیهانی	استاد راهنمای	استادیار	
۲	دکتر رضا نادری	استاد مدعو داخلی	استادیار	
۳	دکتر مهدی فاتح	استاد مدعو داخلی	استاد	
۴	دکتر علی معصومی	استاد مدعو خارجی	دانشیار	
۵	دکتر سید امیرکیوان قربانی تنها	استاد مدعو خارجی	استادیار	
۶	دکتر امیرعباس عابدینی	نماینده تحصیلات تکمیلی داشکده	استادیار	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه

ضمون تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم بعمل آید.

رئیس دانشکده و رئیس هیأت داوران :

دکتر احمد احمدی

تاریخ و امضاء

تقدیم به:

مدر و مادر عزیزم

که در سایه دعای خیرشان از الاطاف الہی بسرا مند شده ام.

تقدیر و تشکر

پژوهش پیش رو حاصل حمایت تمام عزیزانی است که اینجانب را در طول انجام این تحقیق مورد لطف خود قرار داده‌اند. بدین وسیله تمایل دارم مراتب تشکر و قدردانی خود را از تمامی این عزیزان ابراز نمایم.

در ابتدا از زحمات استاد ارجمند جناب آقای دکتر علی کیهانی سپاسگزاری می‌نمایم که با صبر و حوصله فراوان بنده را در انجام این تحقیق مورد راهنمایی قرار دادند.

از جناب آقای پروفسور Ni. Q. استاد گروه مهندسی عمران و سازه دانشگاه پلی‌تکنیک هنگ‌کنگ که امکان انجام مطالعات آزمایشگاهی این تحقیق را در دانشگاه پلی‌تکنیک هنگ‌کنگ فراهم آورده، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

از زحمات تکنسین‌های محترم Structural Dynamics Laboratory دانشگاه پلی‌تکنیک هنگ‌کنگ آقایان C. F. Cheung و T. T. Wai و آقایان Weiyang Chen و Zhaohui Chen که برای انجام هماهنگی‌های لازم جهت ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی در کشور چین بنده را همراهی نمودند.

جای دارد از حمایت‌های معنوی خانواده عزیزم که در طول مدت انجام تحقیق همواره از دعای خیرشان بهره مند بوده‌ام، تشکر و قدردانی نمایم.

در پایان از تمامی استادی و دوستان گرامی که با تشویق‌های خود باعث دلگرمی بنده در انجام این رساله بوده‌اند، کمال امتنان را دارم.

اینجانب سید مسعود سجادی آل‌هاشم تایید می‌نمایم که مطالب مندرج در این رساله نتیجه تحقیقات خود بوده و در صورت استفاده از نتایج دیگران مرجع آن را ذکر نموده‌ام. کلیه حقوق مادی مترتب از نتایج مطالعات، آزمایشات و نوآوری ناشی از تحقیق موضوع این رساله متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد.

شهریور ۱۳۹۱

چکیده

در برخی از زلزله‌های حوزه نزدیک دو دهه اخیر، ساختمانهایی که مطابق آییننامه‌های موجود ساخته شده بودند دچار آسیب‌های شدید شدند. مشخصه اصلی این نوع زلزله‌ها وقوع آن‌ها در نواحی نزدیک گسل و وجود یک پالس سرعت پریود بلند به همراه مقادیر بالای بیشینه شتاب، سرعت و جابجایی در حرکت زمین است. وجود این مشخصات ممکن است باعث بروز خرابی و خسارت‌های قابل توجه در سازه‌ها و شریان‌های حیاتی گردد که مطابق آییننامه‌های موجود طراحی و ساخته شده‌اند. از این رو، مطالعه و بهبود رفتار سازه‌ها در زلزله‌های حوزه نزدیک مهم و حائز اهمیت است.

در سال‌های اخیر سیستم‌های کنترل سازه‌ای به عنوان جایگزینی برای سیستم‌های متداول مورد توجه و استفاده قرار گرفته‌اند. یکی از انواع سیستم‌های کنترلی، میراگرهای باز تنظیم شونده می‌باشند که می‌توانند به عنوان راهکاری برای کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها در معرض زلزله‌های حوزه نزدیک مورد استفاده قرار گیرند.

در این تحقیق یک میراگر نیمه‌فعال باز تنظیم شونده جدید ابداع، طراحی و تست شده است. میراگر جدید در واقع یک فنر با سختی متغیر است که این امکان را فراهم می‌آورد تا با باز تنظیم شدن در لحظات مناسب، انرژی ورودی به سیستم را جذب و تلف نماید. در میراگر ابداعی از دو سیال مختلف شامل گاز تحت فشار و سیال مغناطیسی استفاده شده است که هر یک وظیفه مخصوص به خود را دارند. میراگر پیشنهادی شامل یک سیستم سیلندر-پیستون به همراه یک شیر کنترل و یک شیر مغناطیسی است که بر روی یک لوله کنار گذر که دو طرف سیلندر را به یکدیگر متصل می‌سازد، نصب شده‌اند. طراحی خاص میراگر ابداعی باعث حذف محدودیت‌های رایج میراگرهای باز تنظیم شونده شده است. ضمن آن که با معرفی یک مکانیزم ویژه برای اتلاف انرژی، می‌توان عملکرد این میراگرهای کاربردهای عملی ارتقا بخشید.

در این تحقیق ابتدا دو مدل اولیه برای میراگر ساخته شده و رفتار آن‌ها در آزمایشگاه دینامیک سازه دانشگاه پلی‌تکنیک هنگ‌کنگ مورد آزمایش قرار گرفت. در ادامه مدل‌های ریاضی رفتار میراگر ابداعی توسعه داده شده و با استفاده از نتایج تست‌های آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده‌اند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با تغییر پارامترهای قابل تنظیم این میراگر، امکان دستیابی به محدوده وسیعی از سختی‌ها و جابجایی‌ها وجود دارد. بدین ترتیب میراگر پیشنهادی می‌تواند بدون تغییر در ساختار اولیه، برای نیازهای متفاوت طراحی مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این، ساختار خاص میراگر این امکان را فراهم می‌آورد تا میراگر در حالت نصب شده در سازه نیز بتواند به منظور تصحیح رفتار، مورد تنظیم قرار گیرد و نیازی به استفاده از یک میراگر جدید نمی‌باشد.

در این تحقیق سه روش کنترلی متفاوت برای استهلاک انرژی سازه توسط میراگر ابداعی معرفی شده و عملکرد آن‌ها تحت بارگذاری‌های مختلف بررسی شده است. نخست با استفاده از

شبیه‌سازی عددی، روش‌های کنترلی بر روی یک سازه یک درجه آزاد پیاده‌سازی شده و رفتار میراگر از دیدگاه انرژی ارزیابی گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از میراگر ابداعی باعث کاهش سطح انرژی ورودی به سازه یک درجه آزاد شده است. ضمن آن که استفاده از میراگر باعث شده تا انرژی ورودی به سازه سریع‌تر تلف شود. در ادامه پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه مجهز به این میراگرها تحت یک مجموعه از زلزله‌های حوزه نزدیک به صورت عددی شبیه‌سازی شده است. در این شبیه‌سازی اثر روش‌های مختلف کنترل و همچنین تاثیر سختی میراگر بر رفتار ساختمان‌های مورد مطالعه بررسی شده است. ارزیابی روش‌های مختلف کنترل نشان می‌دهد که هر یک از روش‌ها دارای ویژگی منحصر به فرد خود بوده و بسته به نیاز طراحی، امکان استفاده از این ویژگی‌ها برای کنترل پاسخ لرزه‌ای سازه وجود دارد. نتایج تحقیق نشان دهنده عملکرد موثر میراگر ابداعی در کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌های مطالعه شده تحت زلزله‌های حوزه نزدیک است و میراگر ابداعی امکان تنظیم سختی و میرایی سازه را به طور مستقل فراهم می‌نماید. ضمن آنکه با استفاده از روش‌های مختلف کنترلی می‌توان منحنی هیستوژریس سازه را متناسب با نیاز لرزه‌ای تغییر داد.

کلمات کلیدی: زلزله حوزه نزدیک؛ کنترل لرزه‌ای؛ کنترل نیمه‌فعال؛ میراگر باز تنظیم شونده؛ پاسخ لرزه‌ای؛ سختی متغیر؛ سیال مغناطیسی.

لیست مقالات مستخرج از رساله

1. Keyhani, A., **Sajjadi Alehashem, S. M.**, and Ni, Y. Q. (2013). "Fabrication and experiment of a hydro-pneumatic semi-active resettable device." *Asian Journal of Civil Engineering (BHRC)*. Vol. 14, No. 1, pp 47-70. (Online version)
2. **Sajjadi Alehashem, S. M.**, Keyhani, A., and Ni, Y. Q. (2011). "Hydro-pneumatic semi-active resettable device by using MR-fluid (MR-HSRD) for vibration suppression." *Proc., 6th International Conference of Seismology and Earthquake Engineering*, Tehran, Iran.
3. **Sajjadi Alehashem, S. M.**, Ni, Y. Q., and Keyhani, A. (2010). "Fabrication and experiment of a semi-active resettable energy dissipating device using MR-fluid." *Proc., 5th World Conference on Structural Control and Monitoring (5WCSCM)*, Tokyo, Japan.

فهرست مطالب

۵.....	فهرست شکل‌ها
م.....	فهرست جدول‌ها

فصل اول) مفاهیم کلی

۲	۱-۱- مقدمه
۳	۱-۲- زلزله‌های حوزه نزدیک
۳	۱-۲-۱- محدوده نزدیک گسل
۴	۱-۳- مشخصات زلزله‌های حوزه نزدیک
۴	۱-۳-۱- اثر جهت‌گیری شکست
۸	۱-۳-۲- اثر گام جهشی
۱۰	۱-۳-۳- اثر مولفه قائم زلزله در زلزله‌های حوزه نزدیک
۱۰	۱-۴- مولفه‌های رکورد زلزله‌های حوزه نزدیک
۱۱	۱-۵- اثر پالس گونه با پریود بلند
۱۲	۱-۶- مقادیر بالای بیشینه شتاب، سرعت و جابجایی
۱۳	۱-۷- انتقال انرژی در مدت زمان کوتاه و اعمال نیروی ضربه‌گونه به سازه‌ها
۱۳	۱-۸- ضوابط آیین‌نامه‌ای برای لحاظ نمودن اثرات حوزه نزدیک
۱۴	۱-۹- آیین‌نامه UBC97
۱۶	۱-۱۰- آیین‌نامه تایوان
۱۶	۱-۱۱- طراحی لرزه‌ای سازه‌ها و اثر زلزله‌های حوزه نزدیک بر آن
۱۶	۱-۱۲- طراحی متداول
۱۷	۱-۱۳- طراحی با استفاده از سیستم‌های کنترلی
۱۹	۱-۱۴- طراحی با استفاده از سیستم‌های جداسازی پایه
۱۹	۱-۱۵- اثر زلزله‌های حوزه نزدیک بر روی سیستم‌های متداول ساختمانی
۲۷	۱-۱۶- اثر زلزله‌های حوزه نزدیک بر روی سازه‌های مجهز به سیستم‌های جداسازی پایه و سیستم‌های کنترل لرزه‌ای

فصل دوم) تاریخچه تحقیقات مرتبط با میراگرهای باز تنظیم شونده

۳۲	۲-۱- مقدمه
----------	------------

۳۲	- سیستم‌های کنترل نیمه فعال.....	۲-۲
۳۳	- تجهیزات کنترل سختی نیمه فعال.....	۲-۲-۱
۳۴	- تجهیزات کنترل اصطکاک نیمه فعال	۲-۲-۲
۳۵	- میراگرهای سیال لزج با روزنه متغیر نیمه فعال.....	۲-۲-۳
۳۶	- میراگرهای جرمی/اماکنی تنظیم شده نیمه فعال (STMD/STLD).....	۲-۲-۴
۳۷	- میراگرهای MR/ER.....	۲-۲-۵
۳۹	- میراگرهای MRE.....	۲-۲-۶
۴۰	- پارامترهای سیستم کنترلی نیمه فعال مناسب برای مقابله با زلزله‌های حوزه نزدیک.....	۲-۳
۴۱	- تحقیقات انجام شده مرتبط با میراگرهای نیمه فعال باز تنظیم شونده.....	۲-۴
۶۰	- مشکلات و کمبودهای تکنیکی تجهیزات باز تنظیم شونده فعلی	۲-۵

فصل سوم) معرفی میراگر ابداعی

۶۵	- مقدمه	۳-۱
۶۵	- معرفی میراگر MR-HSRD ابداعی	۳-۲
۶۷	- مدل رفتاری میراگر ابداعی	۳-۳
۷۱	- مکانیزم اتلاف انرژی در میراگر ابداعی	۳-۴
۷۸	- دیدگاه‌های کنترلی میراگر ابداعی	۳-۵
۸۳	- ویژگی‌های منحصر بفرد میراگر ابداعی	۳-۶
۸۳	- تنظیم نیروی مقاوم میراگر مناسب با نیاز طراحی بدون نیاز به تعویض میراگر	۳-۶-۱
۸۳	- تنظیم کورس پیستون مناسب با نیاز طراحی بدون نیاز به تعویض میراگر	۳-۶-۲
۸۴	- عدم حساسیت میراگر به نحوه نصب در سازه	۳-۶-۳
۸۴	- عدم نیاز به انباشتگر	۳-۶-۴
۸۵	- امکان کنترل نامت مرکز میراگر	۳-۶-۵
۸۵	- امکان دست کاری نمودن رفتار هیسترزیس میراگر	۳-۶-۶
۸۶	- رفتار ایمن از خرابی در صورت بروز مشکل در میراگر	۳-۶-۷
۸۶	- ظرفیت اتلاف انرژی میراگر ابداعی	۳-۷
۸۷	- اثر تغییرات حرارتی محیط بر روی میراگر ابداعی	۳-۸

فصل چهارم) طراحی، ساخت و تست میراگر

۹۱	- مقدمه	۴-۱
۹۱	- طراحی و ساخت میراگر ابداعی	۴-۲
۹۲	- طراحی ابعادی میراگر	۴-۲-۱
۹۴	- طراحی شیر مغناطیسی	۴-۲-۲

۹۷.....	۴-۳-۴- نمونه شماره ۱
۹۷.....	۴-۳-۴- مشخصات طراحی نمونه شماره ۱
۱۰۲.....	۴-۳-۴- تست‌های دینامیکی
۱۱۲.....	۴-۳-۴- تست‌های شبه استاتیکی با دامنه جابجایی بزرگ
۱۱۴.....	۴-۴- نمونه شماره ۲
۱۱۴.....	۴-۴- مشخصات طراحی نمونه شماره ۲
۱۱۶.....	۴-۴- مشخصات طراحی شیر مغناطیسی

فصل پنجم) شبیه‌سازی عددی سیستم یک درجه آزاد مجهرز به میراگر MR-HSRD

۱۱۹.....	۵-۱- مقدمه
۱۱۹.....	۵-۲- مدل‌سازی سیستم یک درجه آزاد مجهرز به میراگر MR-HSRD
۱۲۱.....	۵-۳- ارزیابی پاسخ ارتعاش آزاد سیستم یک درجه آزاد
۱۲۷.....	۵-۴- ارزیابی پاسخ سیستم یک درجه آزاد تحت زلزله حوزه نزدیک
۱۳۰.....	۵-۴-۱- پاسخ جابجایی
۱۳۱.....	۵-۴-۲- پاسخ شتاب
۱۳۱.....	۵-۴-۳- برش پایه
۱۳۴.....	۵-۴-۴- نیروی میراگر
۱۶۵.....	۵-۴-۵- پاسخ‌های حداکثر سیستم یک درجه آزاد
۱۶۶.....	۵-۴-۶- انرژی کل سیستم
۱۴۲.....	۵-۴-۷- مجموع انرژی جنبشی و پتانسیل سیستم

فصل ششم) شبیه‌سازی عددی سازه‌های مجهرز به میراگرهای MR-HSRD تحت زلزله‌های حوزه نزدیک

۱۴۵.....	۶-۱- مقدمه
۱۴۵.....	۶-۲- مدل‌سازی قاب‌های ساختمانی ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه مجهرز به میراگرهای MR-HSRD
۱۴۶.....	۶-۲-۱- مدل‌سازی به روش فضای حالت
۱۴۷.....	۶-۲-۱-۱- مدل‌سازی سیستم کنترل نشده
۱۵۰.....	۶-۲-۱-۲- مدل‌سازی سیستم کنترل شده مجهرز به میراگرهای MR-HSRD
۱۵۴.....	۶-۲-۲- مشخصات قاب‌های ساختمانی مدل‌سازی شده
۱۵۶.....	۶-۲-۲-۱- ماتریس‌های جرم، سختی و میراگری
۱۵۷.....	۶-۲-۲-۲- مشخصات زلزله‌های حوزه نزدیک مطالعه شده
۱۵۸.....	۶-۳- مقایسه عملکرد قاب‌های کنترل نشده و قاب‌های مجهرز به میراگرهای MR-HSRD تحت زلزله‌های حوزه نزدیک

۱۵۹.....	۶-۳-۱- قاب ساختمانی ۵ طبقه
۱۷۳.....	۶-۳-۲- قاب ساختمانی ۱۰ طبقه
۱۸۶.....	۶-۳-۳- قاب ساختمانی ۱۵ طبقه
۱۹۹.....	فصل هفتم) جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
۲۰۶.....	تحقیقات آینده
۲۰۷.....	فهرست منابع و مراجع
۲۱۵.....	پیوست الف- تاریخچه زمانی و طیف پاسخ الاستیک زلزله‌های حوزه نزدیک مطالعه شده

فهرست شکل‌ها

شکل ۱ - ۱ - اثرات ناشی از جهت‌گیری شکست برای ساختگاه A و B.....	۵
شکل ۱ - ۲ - نقشه ناحیه لندرز و موقعیت شکست ناشی از زمین‌لرزه لندرز (۱۹۹۲) و اثر جهت‌گیری شکست در رکورد سرعت ثبت شده در جهت‌گیری شکست پیش‌رونده و پس‌رونده.....	۶
شکل ۱ - ۳ - تاریخچه زمانی شتاب، سرعت و جابجایی زمین‌لرزه لندرز (۱۹۹۲)؛ (الف) در محدوده جهت‌گیری شکست پیش‌رونده؛ (ب) در محدوده جهت‌گیری شکست پس‌رونده.....	۶
شکل ۱ - ۴ - خرابی ناشی از گسل فشاری چلانگپو (گسل مسبب زلزله چی-چی تایوان).....	۷
شکل ۱ - ۵ - جهت پالس ناشی از جهت‌گیری شکست و تغییر مکان ماندگار ناشی از گام جهشی؛ (الف) گسل‌شش شبیب لغز (مقطع عرضی گسل)؛ (ب) گسل‌شش امتداد لغز (پلان گسل).....	۹
شکل ۱ - ۶ - نمودار شماتیک تاریخچه زمانی جابجایی که در آن پالس مربوط به گام جهشی و جهت‌گیری شکست به صورت جداگانه و ترکیبی نشان داده شده است. (الف) گسل‌شش امتداد لغز؛ (ب) گسل‌شش شبیب لغز.....	۹
شکل ۱ - ۷ - تاریخچه زمانی سرعت و جابجایی رکورد زلزله نورث‌ریدج (۱۹۹۴)؛ (الف) مولفه عمود بر گسل (مولفه نرمال)؛ (ب) مولفه موازی گسل.....	۱۱
شکل ۱ - ۸ - تاریخچه زمانی شتاب، سرعت و جابجایی رکوردهای ثبت شده در نزدیک گسل؛ (الف) زمین‌لرزه نورث‌ریدج (۱۹۹۴)؛ (ب) زمین‌لرزه کوبه (۱۹۹۵).....	۱۲
شکل ۱ - ۹ - تاریخچه زمانی شتاب، سرعت و جابجایی؛ (الف) زلزله دور از گسل تفت؛ (ب) زلزله نزدیک گسل نورث‌ریدج.....	۱۳
شکل ۱ - ۱۰ - مدل شماتیک؛ (الف) طراحی متداول؛ (ب) کنترل پاسخ دینامیکی؛ (ج) جداسازی پایه	
	۱۷
شکل ۱ - ۱۱ - طیف پاسخ سه جانبی مولفه عمود بر گسل حرکات زمین به ازاء میرایی $\gamma = 5^\circ$ ؛ (الف) زلزله دور از گسل تفت؛ (ب) زلزله نزدیک گسل نورث‌ریدج.....	۲۳
شکل ۱ - ۱۲ - نیاز شکل‌پذیری طبقه برای زمینلزرهای نزدیک گسل مختلف، $T=2 \text{ sec}$ ؛ (الف) ضریب مقاومتی $\gamma = 0.15$ (سازه ضعیف)؛ (ب) ضریب مقاومتی $\gamma = 0.4$ (سازه قوی).....	۲۴
شکل ۱ - ۱۳ - وابستگی نیاز شکل‌پذیری طبقه و ضریب مقاومتی (γ) برای زلزله $rrs_{94 NR}$ ؛ (الف) $T=2 \text{ sec}$ ؛ (ب) $T=0.5 \text{ sec}$	۲۴
شکل ۱ - ۱۴ - تجهیزات کنترل سختی آزمایش شده توسط کوبوری و همکاران؛ (الف) جزئیات نصب؛ (ب) حالت‌های مختلف قرارگیری تجهیزات کنترل سختی در سازه آزمایش شده.....	۳۴

..... ۳۵	شكل ۲-۲- منحنی هیسترزیس میراگر اصطکاکی کولمب ایده آل
..... ۳۶	شكل ۲-۳- شماتیک میراگر سیال لزج با روزنہ متغیر آزمایش شده توسط
..... ۳۷	شكل ۲-۴- میراگر جرمی تنظیم شده نیمه فعال با فنر قابل تنظیم
..... ۳۸	شكل ۲-۵- ساختار زنجیرهای شکل ذرات معلق در ماده MR/ER تحت میدان الکتریکی/مغناطیسی خارجی
..... ۳۹	شكل ۲-۶- شماتیک مقطع عرضی نشیمن نیمه فعال ساخته شده از MRE
..... ۴۳	شكل ۲-۷- میراگرهای نیمه فعال باز تنظیم شونده؛ (الف) میراگر باز تنظیم شونده هیدرولیکی؛ (ب) میراگر باز تنظیم شونده بادی
..... ۴۵	شكل ۲-۸- شماتیک دیاگرام و مدل میراگر SASD
..... ۴۶	شكل ۲-۹- نمای خارجی میراگر و کنترلر با مقیاس واقعی
..... ۴۸	شكل ۲-۱۰- میراگر روغنی نیمه فعال نصب شده در ساختمان مورد مطالعه
..... ۴۸	شكل ۲-۱۱- میراگر سختی متغیر با ظرفیت نیرویی ۳۰،۰۰۰ پند
..... ۴۹	شكل ۲-۱۲- (الف) شماتیک میراگر دو-محفظه‌ای؛ (ب) نمونه آزمایشگاهی میراگر تست شده
..... ۵۰	شكل ۲-۱۳- میراگر دو محفظه‌ای مطالعه شده توسط
..... ۵۲	شكل ۲-۱۴- شماتیک سیستم دیوار گهواره‌ای به همراه میراگر باز تنظیم شونده
..... ۵۳	شكل ۲-۱۵- (الف) قاب سه طبقه آزمایش شده بر روی میز لرزان؛ (ب) میراگر RSASD نصب شده در طبقه اول
..... ۵۴	شكل ۲-۱۶- شماتیک میراگر باز تنظیم شونده دو-محفظه‌ای متصل به مخزن هوای فشرده
..... ۵۵	شكل ۲-۱۷- شماتیک سیستم جداسازی شده از پایه مجهز به تجهیزات باز تنظیم شونده نیمه فعال دو-محفظه‌ای که در آن b معرف پایه و S معرف سازه جداسازی شده است
..... ۵۷	شكل ۲-۱۸- سازه چهار طبقه آزمایش شده مجهز به میراگرهای باز تنظیم شونده دو-محفظه‌ای
..... ۵۷	شكل ۲-۱۹- نمای نزدیک میراگر دو-محفظه‌ای متصل به سازه مورد آزمایش به همراه سنسور تغییر مکان (به صورت موازی با میراگر) و سنسور نیرو (در امتداد شفت)
..... ۵۹	شكل ۲-۲۰- شماتیک سازه آزمایش شده و وضعیت قرارگیری تجهیزات اندازه‌گیری (ابعاد بر حسب میلیمتر می‌باشد)
..... ۶۰	شكل ۲-۲۱- (الف) ابعاد میراگر ASD و موقعیت قرارگیری شیرها؛ (ب) چیدمان آزمایش
..... ۶۲	شكل ۲-۲۲- منحنی نیرو- تغییر مکان آزمایشگاهی و تحلیلی با استفاده از روش کنترلی ۴-۲ برای تحریک سینوسی با دامنه ۱۰ mm در فرکانس‌های ۰/۱، ۰/۵، ۱/۰ و ۳/۰ Hz

- شکل ۴-۶- طرح شماتیک میراگر شماره ۱ ۹۸
- شکل ۴-۷- تصویر میراگر شماره ۱ و چیدمان تست میراگر؛ (الف) سیلندرهای گاز تحت فشار به همراه پایه قابل تنظیم برای تغییر طول مخزن گاز، (ب) سیلندر روغن به همراه شیلنگ‌های رابط و شیر کنار گذر دستی ۹۹
- شکل ۴-۸- نقشه سیلندر روغن (کلیه ابعاد بر حسب میلیمتر می‌باشد) ۱۰۰
- شکل ۴-۹- نقشه سیلندرهای گاز تحت فشار (کلیه ابعاد بر حسب میلیمتر می‌باشد) ۱۰۰
- شکل ۴-۱۰- تغییر فشار گاز مخزن با استفاده از پمپ هوای دستی ۱۰۱
- شکل ۴-۱۱- رابطه بین سختی میراگر (K_d) و طول اولیه مخزن گاز (L_{0G}) برای مقادیر مختلف p_{0G} با فرض رفتار خطی در میراگر شماره ۱ با قطر داخلی سیلندر $D=۳۰\text{ mm}$ و cm^3 ۱۰۱
- $V_{con}=10$
- شکل ۴-۱۲- پاسخ نیرو-تغییرمکان میراگر شماره ۱ به همراه مدل خطی برای میراگر با mm و cm^3 و $L_{0G}=20$ ، تحت تغییرمکان سینوسی 10 mm با فرکانس‌های 1 Hz و 10 Hz ۱۰۴
- (الف) در حالت شیر-بسته (ب) در حالت شیر-باز ۱۰۵
- شکل ۴-۱۳- پاسخ نیرو-تغییرمکان میراگر شماره ۱ به همراه مدل خطی برای میراگر با mm و cm^3 و $L_{0G}=30$ ، تحت تغییرمکان سینوسی 10 mm با فرکانس‌های 1 Hz و 10 Hz ۱۰۶
- (الف) در حالت شیر-بسته، (ب) در حالت شیر-باز ۱۰۵
- شکل ۴-۱۴- پاسخ نیرو-تغییرمکان میراگر شماره ۱ به همراه مدل خطی برای میراگر با mm و cm^3 و $L_{0G}=30$ ، تحت تغییرمکان سینوسی 20 mm با فرکانس‌های 1 Hz و 10 Hz ۱۰۷
- (الف) در حالت شیر-بسته، (ب) در حالت شیر-باز ۱۰۵
- شکل ۴-۱۵- پاسخ نیرو-تغییرمکان میراگر شماره ۱ به همراه مدل خطی برای میراگر با mm و cm^3 و $L_{0G}=40$ ، تحت تغییرمکان سینوسی 10 mm با فرکانس‌های 1 Hz و 10 Hz ۱۰۸
- (الف) در حالت شیر-بسته، (ب) در حالت شیر-باز ۱۰۵
- شکل ۴-۱۶- پاسخ نیرو-تغییرمکان میراگر شماره ۱ به همراه مدل خطی برای میراگر با mm و cm^3 و $L_{0G}=40$ ، تحت تغییرمکان سینوسی 20 mm با فرکانس‌های 1 Hz و 10 Hz ۱۰۹
- (الف) در حالت شیر-بسته، (ب) در حالت شیر-باز ۱۰۵
- شکل ۴-۱۷- پاسخ نیرو-تغییرمکان میراگر شماره ۱ به همراه مدل خطی برای میراگر با mm و cm^3 و $L_{0G}=40$ ، تحت تغییرمکان سینوسی 30 mm با فرکانس‌های 1 Hz و 10 Hz ۱۱۱
- (الف) در حالت شیر-بسته، (ب) در حالت شیر-باز ۱۱۱
- شکل ۴-۱۸- پاسخ نیرو-تغییرمکان میراگر شماره ۱ در تست شبه استاتیکی برای مقادیر مختلف p_{0G} وقتی $V_{con}=10\text{ cm}^3$ و $L_{0G}=50\text{ mm}$ ۱۱۲

- شکل ۴-۱۹- پاسخ نیرو-تغییرمکان میراگر شماره ۱ به همراه مدل خطی و غیرخطی در تست شبه استاتیکی برای میراگر با $L_{0G}=50$ mm و $V_{con}=10$ cm^3 ; (الف) $p_{0G}=250$ kN/m²، (ب) $p_{0G}=1000$ kN/m²، (ج) $p_{0G}=750$ kN/m²، (د) $p_{0G}=500$ kN/m²، (ه) $p_{0G}=1250$ kN/m²..... ۱۱۳
- شکل ۴-۲۰- نقشه‌های مربوط به نمونه شماره ۲ (کلیه ابعاد بر حسب میلیمتر می‌باشد)..... ۱۱۵
- شکل ۴-۲۱- شیر کنترل به کار رفته در میراگر MR-HSRD..... ۱۱۵
- شکل ۴-۲۲- مقطع عرضی نمونه اولیه شیر مغناطیسی..... ۱۱۷
- شکل ۴-۲۳- نمونه اولیه شیر مغناطیسی ساخته شده..... ۱۱۷
- شکل ۵-۱- مدل Simulink سیستم یک درجه آزاد فاقد سیستم کنترل در محیط MATLAB..... ۱۲۰
- شکل ۵-۲- مدل Simulink سازه یک درجه آزاد مجهز به میراگر MR-HSRD در محیط MATLAB برای روش کنترل باز تنظیمی..... ۱۲۱
- شکل ۵-۳- پاسخ زمانی جابجایی سیستم یک درجه آزادی برای $K_d=0/25K$ ۱۲۲
- شکل ۵-۴- پاسخ زمانی شتاب سیستم یک درجه آزادی برای $K_d=0/25K$ ۱۲۲
- شکل ۵-۵- پاسخ زمانی جابجایی جرم و نیروی میراگر و منحنی نیرو-تغییرمکان برای $K_d=0/25K$ ؛ (الف) روش کنترل باز تنظیمی، (ب) روش کنترل قطع و وصل نوع ۱، (ج) روش کنترل قطع و وصل نوع ۲..... ۱۲۴
- شکل ۵-۶- پاسخ زمانی جابجایی سیستم یک درجه آزادی برای $K_d=0/5K$ ۱۲۵
- شکل ۵-۷- پاسخ زمانی شتاب سیستم یک درجه آزادی برای $K_d=0/5K$ ۱۲۵
- شکل ۵-۸- پاسخ زمانی جابجایی سیستم یک درجه آزادی برای $K_d=K$ ۱۲۶
- شکل ۵-۹- پاسخ زمانی شتاب سیستم یک درجه آزادی برای $K_d=K$ ۱۲۶
- شکل ۵-۱۰- تاریخچه زمانی و طیف پاسخ شتاب، سرعت و جابجایی زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA با میرایی $\ddot{\gamma}/\ddot{\gamma}$ ۱۲۸
- شکل ۵-۱۱- تاریخچه زمانی و طیف پاسخ شتاب، سرعت و جابجایی زلزله لوماپریتا (۱۹۸۹) ایستگاه سد لگزینگتون با میرایی $\ddot{\gamma}/\ddot{\gamma}$ ۱۲۹
- شکل ۵-۱۲- پاسخ زمانی جابجایی سیستم یک درجه آزادی برای روش‌های مختلف کنترل میراگر تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA وقتی $K_d=K$ ۱۳۰
- شکل ۵-۱۳- پاسخ زمانی جابجایی سیستم یک درجه آزادی برای روش‌های مختلف کنترل میراگر تحت زلزله لوماپریتا (۱۹۸۹) ایستگاه سد لگزینگتون وقتی $K_d=K$ ۱۳۱

- شکل ۵-۱۴- پاسخ زمانی شتاب سیستم یک درجه آزادی برای روش‌های مختلف کنترل میراگر تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA وقتی $K_d=K$ ۱۳۲.....
- شکل ۵-۱۵- پاسخ زمانی شتاب سیستم یک درجه آزادی برای روش‌های مختلف کنترل میراگر تحت زلزله لوماپریتا (۱۹۸۹) ایستگاه سد لگزینگتون وقتی $K_d=K$ ۱۳۲.....
- شکل ۵-۱۶- برش پایه سیستم یک درجه آزاد تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA وقتی $K_d=K$ ۱۳۳.....
- شکل ۵-۱۷- برش پایه سیستم یک درجه آزاد تحت زلزله لوماپریتا (۱۹۸۹) ایستگاه سد لگزینگتون وقتی $K_d=K$ ۱۳۳.....
- شکل ۵-۱۸- پاسخ زمانی جابجایی نسبی بین طبقه ای، نیروی میراگر و منحنی نیرو-تغییرمکان میراگر تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA وقتی $K_d=K$; (الف) روش کنترل باز تنظیمی، (ب) روش کنترل قطع و وصل نوع ۱، (ج) روش کنترل قطع و وصل نوع ۲ ۱۳۵.....
- شکل ۵-۱۹- پاسخ زمانی جابجایی نسبی بین طبقه ای، نیروی میراگر و منحنی نیرو-تغییرمکان میراگر تحت زلزله لوماپریتا (۱۹۸۹) ایستگاه سد لگزینگتون وقتی $K_d=K$; (الف) روش کنترل باز تنظیمی، (ب) روش کنترل قطع و وصل نوع ۱، (ج) روش کنترل قطع و وصل نوع ۲ ۱۳۶.....
- شکل ۵-۲۰- پاسخ زمانی انرژی کل سیستم یک درجه آزاد تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA وقتی $K_d=K$; (الف) روش کنترل باز تنظیمی، (ب) روش کنترل قطع و وصل نوع ۱، (ج) روش کنترل قطع و وصل نوع ۲، (د) روش کنترل غیرفعال، (ه) کنترل نشده ۱۴۰.....
- شکل ۵-۲۱- پاسخ زمانی انرژی کل سیستم یک درجه آزاد تحت زلزله لوماپریتا (۱۹۸۹) ایستگاه سد لگزینگتون وقتی $K_d=K$; (الف) روش کنترل باز تنظیمی، (ب) روش کنترل قطع و وصل نوع ۱، (ج) روش کنترل قطع و وصل نوع ۲، (د) روش کنترل غیرفعال، (ه) کنترل نشده ۱۴۱.....
- شکل ۵-۲۲- پاسخ زمانی مجموع انرژی پتانسیل و جنبشی سیستم یک درجه آزاد تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA وقتی $K_d=K$ ۱۴۳.....
- شکل ۵-۲۳- پاسخ زمانی مجموع انرژی پتانسیل و جنبشی سیستم یک درجه آزاد تحت زلزله لوماپریتا (۱۹۸۹) ایستگاه سد لگزینگتون وقتی $K_d=K$ ۱۴۳.....
- شکل ۶-۱- مدل برشی یک قاب ساختمانی چند طبقه فاقد سیستم کنترلی و تعادل نیروها در طبقه ام ۱۴۹.....

- شکل ۶-۲- مدل برشی یک قاب ساختمانی چند طبقه مجهز به میراگرهای MR-HSRD و تعادل نیروها در طبقه n ام ۱۵۱
- شکل ۶-۳- مد شکل‌ها و زمان تناوب سه مد اول قاب‌های مطالعه شده (الف) قاب ۵ طبقه، (ب) قاب ۱۰ طبقه، (ج) قاب ۱۵ طبقه ۱۵۶
- شکل ۶-۴- پاسخ زمانی جابجایی بام قاب ۵ طبقه تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA وقتی $K_d=K$ ۱۶۸
- شکل ۶-۵- پاسخ زمانی شتاب مطلق بام قاب ۵ طبقه تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA وقتی $K_d=K$ ۱۶۸
- شکل ۶-۶- جابجایی نسبی تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA؛ (الف) $K_d=0.25K$ ، (ب) $K_d=K$ ، (ج) $K_d=0.5K$ ۱۶۹
- شکل ۶-۷- شتاب RMS طبقات تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA؛ (الف) $K_d=0.25K$ ، (ب) $K_d=K$ ، (ج) $K_d=0.5K$ ۱۶۹
- شکل ۶-۸- نیروی برشی حداکثر طبقات تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA؛ (الف) $K_d=K$ ، (ب) $K_d=0.5K$ ، (ج) $K_d=0.25K$ ۱۷۱
- شکل ۶-۹- پاسخ زمانی برش پایه قاب ۵ طبقه تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA وقتی $K_d=K$ ۱۷۱
- شکل ۶-۱۰- پاسخ زمانی جابجایی نسبی، نیروی میراگر و منحنی نیرو-تغییرمکان میراگر در تراز بام قاب ۵ طبقه تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA وقتی $K_d=K$ ؛ (الف) روش کنترل باز تنظیمی، (ب) روش کنترل قطع و وصل نوع ۱، (ج) روش کنترل قطع و وصل نوع ۲ ۱۷۲
- شکل ۶-۱۱- پاسخ زمانی جابجایی بام قاب ۱۰ طبقه تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA وقتی $K_d=K$ ۱۸۰
- شکل ۶-۱۲- پاسخ زمانی شتاب مطلق بام قاب ۱۰ طبقه تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA وقتی $K_d=K$ ۱۸۱
- شکل ۶-۱۳- جابجایی نسبی تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA؛ (الف) $K_d=0.25K$ ، (ب) $K_d=K$ ، (ج) $K_d=0.5K$ ۱۸۲
- شکل ۶-۱۴- شتاب RMS طبقات تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA؛ (الف) $K_d=0.25K$ ، (ب) $K_d=K$ ، (ج) $K_d=0.5K$ ۱۸۳
- شکل ۶-۱۵- نیروی برشی حداکثر طبقات تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA؛ (الف) $K_d=K$ ، (ب) $K_d=0.5K$ ، (ج) $K_d=0.25K$ ۱۸۳

- شكل ۶-۱۶- پاسخ زمانی برش پایه قاب ۱۰ طبقه تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA وقتی
۱۸۴..... $K_d=K$
- شكل ۶-۱۷- پاسخ زمانی جابجایی نسبی، نیروی میراگر و منحنی نیرو-تغییرمکان میراگر در تراز بام
قاب ۱۰ طبقه تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA وقتی $K_d=K$; (الف) روش کنترل
باز تنظیمی، (ب) روش کنترل قطع و وصل نوع ۱، (ج) روش کنترل قطع و وصل نوع ۲
۱۸۵.....
- شكل ۶-۱۸- پاسخ زمانی جابجایی بام قاب ۱۵ طبقه تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA وقتی
۱۹۳..... $K_d=K$
- شكل ۶-۱۹- پاسخ زمانی شتاب مطلق بام قاب ۱۵ طبقه تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA وقتی
۱۹۴..... $K_d=K$
- شكل ۶-۲۰- جابجایی نسبی تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA; (الف) $K_d=0.25K$ ، (ب)
۱۹۵..... $K_d=K$ (ج) $K_d=0.5K$
- شكل ۶-۲۱- شتاب RMS طبقات تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA; (الف) $K_d=0.25K$ ، (ب)
۱۹۵..... $K_d=K$ ، (ج) $K_d=0.5K$
- شكل ۶-۲۲- نیروی برشی حداکثر طبقات تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA; (الف)
۱۹۷..... $K_d=K$ (ج) $K_d=0.5K$ ، (ب) $K_d=0.25K$
- شكل ۶-۲۳- پاسخ زمانی برش پایه قاب ۱۵ طبقه تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA وقتی
۱۹۷..... $K_d=K$
- شكل ۶-۲۴- پاسخ زمانی جابجایی نسبی، نیروی میراگر و منحنی نیرو-تغییرمکان میراگر در تراز بام
قاب ۱۵ طبقه تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA وقتی $K_d=K$; (الف) روش کنترل
باز تنظیمی، (ب) روش کنترل قطع و وصل نوع ۱، (ج) روش کنترل قطع و وصل نوع ۲
۱۹۸.....

فهرست جدول‌ها

جدول ۱ - ۱ - مقادیر پارامتر N_a با لحاظ نمودن منابع مختلف لرزه‌ای	۱۵
جدول ۱ - ۲ - مقادیر پارامتر N_V با لحاظ نمودن منابع مختلف لرزه‌ای	۱۵
جدول ۴ - ۱ - مقادیر مختلف سختی نمونه شماره ۱ بر اساس مدل خطی برای L_{0G} و P_{0G} های متفاوت	۱۰۳
جدول ۵ - ۱ - پاسخ‌های حداکثر سازه یک درجه آزاد	۱۳۷
جدول ۶ - ۱ - مشخصات فیزیکی قاب ۵ طبقه	۱۵۵
جدول ۶ - ۲ - مشخصات فیزیکی قاب ۱۰ طبقه	۱۵۵
جدول ۶ - ۳ - مشخصات فیزیکی قاب ۱۵ طبقه	۱۵۵
جدول ۶ - ۴ - مشخصات زلزله‌های حوزه نزدیک مطالعه شده	۱۵۸
جدول ۶ - ۵ - پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۵ طبقه تحت زلزله مندوسینو (۱۹۹۲) ایستگاه پترولیا	۱۶۲
جدول ۶ - ۶ - پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۵ طبقه تحت زلزله ارزینکان (۱۹۹۲) ایستگاه ارزینکان	۱۶۲
جدول ۶ - ۷ - پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۵ طبقه تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA	۱۶۳
جدول ۶ - ۸ - پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۵ طبقه تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه تاکاتوری	۱۶۳
جدول ۶ - ۹ - پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۵ طبقه تحت زلزله لندرز (۱۹۹۲) ایستگاه لاسرن	۱۶۴
جدول ۶ - ۱۰ - پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۵ طبقه تحت زلزله لوماپریتا (۱۹۸۹) ایستگاه سد لگزینگتون	۱۶۴
جدول ۶ - ۱۱ - پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۵ طبقه تحت زلزله لوماپریتا (۱۹۸۹) ایستگاه لس گاتوس	۱۶۵
جدول ۶ - ۱۲ - پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۵ طبقه تحت زلزله نورث‌ریدج (۱۹۹۴) ایستگاه رینالدی	۱۶۵
جدول ۶ - ۱۳ - پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۵ طبقه تحت زلزله نورث‌ریدج (۱۹۹۴) ایستگاه اولیویو	۱۶۶

جدول ۶-۱۴- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۵ طبقه تحت زلزله طبس (۱۹۷۸) ایستگاه طبس	۱۶۶
جدول ۶-۱۵- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۱۰ طبقه تحت زلزله مندوسینو (۱۹۹۲) ایستگاه پترولیا	۱۷۵
جدول ۶-۱۶- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۱۰ طبقه تحت زلزله ارزینکان (۱۹۹۲) ایستگاه ارزینکان	۱۷۵
جدول ۶-۱۷- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۱۰ طبقه تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA	۱۷۶
جدول ۶-۱۸- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۱۰ طبقه تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه تاکاتوری	۱۷۶
جدول ۶-۱۹- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۱۰ طبقه تحت زلزله لندرز (۱۹۹۲) ایستگاه لاسرن.	۱۷۷
جدول ۶-۲۰- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۱۰ طبقه تحت زلزله لوماپریتا (۱۹۸۹) ایستگاه سد لگزینگتون	۱۷۷
جدول ۶-۲۱- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۱۰ طبقه تحت زلزله لوماپریتا (۱۹۸۹) ایستگاه لس گاتوس.	۱۷۸
جدول ۶-۲۲- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۱۰ طبقه تحت زلزله نورث‌ریدج (۱۹۹۴) ایستگاه رینالدی.	۱۷۸
جدول ۶-۲۳- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۱۰ طبقه تحت زلزله نورث‌ریدج (۱۹۹۴) ایستگاه اولیویو	۱۷۹
جدول ۶-۲۴- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۱۰ طبقه تحت زلزله طبس (۱۹۷۸) ایستگاه طبس.	۱۷۹
جدول ۶-۲۵- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۱۵ طبقه تحت زلزله مندوسینو (۱۹۹۲) ایستگاه پترولیا	۱۸۸
جدول ۶-۲۶- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۱۵ طبقه تحت زلزله ارزینکان (۱۹۹۲) ایستگاه ارزینکان	۱۸۸
جدول ۶-۲۷- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۱۵ طبقه تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA	۱۸۹
جدول ۶-۲۸- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۱۵ طبقه تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه تاکاتوری	۱۸۹

جدول ۶-۲۹- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۱۵ طبقه تحت زلزله لندرز (۱۹۹۲) ایستگاه لاسرن.	۱۹۰
جدول ۶-۳۰- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۱۵ طبقه تحت زلزله لوماپریتا (۱۹۸۹) ایستگاه سد لگزینگتون	۱۹۰
جدول ۶-۳۱- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۱۵ طبقه تحت زلزله لوماپریتا (۱۹۸۹) ایستگاه لس گاتوس.	۱۹۱
جدول ۶-۳۲- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۱۵ طبقه تحت زلزله نورث‌ریدج (۱۹۹۴) ایستگاه رینالدی.	۱۹۱
جدول ۶-۳۳- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۱۵ طبقه تحت زلزله نورث‌ریدج (۱۹۹۴) ایستگاه اولیویو.	۱۹۲
جدول ۶-۳۴- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۱۵ طبقه تحت زلزله طبس (۱۹۷۸) ایستگاه طبس.	۱۹۲

فصل اول

مفاهیم کلی

۱-۱- مقدمه

در سال‌های اخیر پس از وقوع زلزله‌های مخرب نورثریدج^۱ (۱۹۹۴)، کوبه^۲ (۱۹۹۵)، کوکاییلی^۳ (۱۹۹۹) و چی-چی^۴ (۱۹۹۹) که عموماً از نوع زلزله‌های حوزه نزدیک^۵ بودند، نظر دانشمندان زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله به بررسی بیشتر و عمیق تر این نوع زلزله‌ها و اثرات آن بر سازه‌ها جلب شد. با وجود اینکه اکثر سازه‌های آسیب دیده در خلال زلزله‌های مذکور بر اساس آیین‌نامه‌های روز دنیا ساخته شده بودند اما در اثر وقوع زلزله‌های حوزه نزدیک آسیب‌های فراوانی دیدند که نشان از ضعف ضوابط آیین‌نامه‌های موجود در خصوص این نوع زلزله‌ها دارد و لزوم بررسی و تحقیقات بیشتر در این زمینه را آشکارتر می‌سازد. در واقع ضوابط اکثر آیین‌نامه‌های موجود برای زلزله‌های حوزه دور و اثر این نوع زلزله‌ها بر روی سازه‌ها تنظیم شده است و عملاً به زلزله‌های حوزه نزدیک و اثرات آن بر روی سازه توجهی نشده است. تحقیقاتی پیرامون شناخت ماهیت و مشخصات زلزله‌های حوزه نزدیک و تفاوت‌های آن با زلزله‌های حوزه دور انجام پذیرفته است. علاوه بر این تحقیقات محدودی توسط تعدادی از محققین در خصوص بررسی رفتار سازه‌ها در معرض زلزله‌های حوزه نزدیک انجام شده است. با توجه به سابقه کم تحقیقات انجام شده در خصوص نحوه کنترل سازه‌ها در معرض زلزله‌های حوزه نزدیک و عدم ارائه روش‌های کنترلی مناسب و همچنین لزوم کاهش خسارت‌های ناشی از زلزله‌های حوزه نزدیک، تحقیقات بیشتر و مفصل‌تر در این خصوص لازم به نظر می‌رسد.

در این فصل مشخصات ویژه زلزله‌های حوزه نزدیک و اثر این نوع زلزله‌ها بر روی سازه‌ها ارائه می‌شود و ضوابط آیین‌نامه‌ای موجود برای لحاظ نمودن اثر زلزله‌های حوزه نزدیک ارائه شده است. در ادامه نحوه عملکرد سیستم‌های ساختمانی متداول و سیستم‌های مختلف کنترلی برای کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها در مواجهه با زلزله‌های حوزه نزدیک بررسی شده و معایب و مزایای هر یک تشریح می‌گردد.

¹ Northridge

² Kobe

³ Kocaeli

⁴ Chi-chi

⁵ Near-field earthquake

۱-۲- زلزله‌های حوزه نزدیک

پس از وقوع زلزله‌های حوزه نزدیک و با توجه به خسارت‌های شدید ایجاد شده توسط این نوع زلزله‌ها بر روی سازه‌هایی که مطابق آیین‌نامه‌های موجود طراحی و ساخته شده بودند، محققین را به تحقیق و مطالعه بیشتر بر روی این نوع زلزله‌ها که عمدتاً از نوع حرکات حوزه نزدیک بودند ترغیب نمود. طی زمین‌لرزه‌های مذکور سازه‌ها متحمل خسارت‌های عمدتی شدند که دلیل این امر طراحی این سازه‌ها با استفاده از طیف پاسخ بدون در نظر گرفتن اثر رکوردهای حوزه نزدیک بر روی سازه‌ها است؛ زیرا برای سازه‌هایی که در معرض زلزله‌های حوزه نزدیک قرار می‌گیرند طیف پاسخ به تنها‌یی بیانگر رفتار واقعی سازه نمی‌باشد. سازه با توجه به ویژگی‌های نزدیک گسل رفتاری متفاوت از آنچه انتظار می‌رود نشان می‌دهد. در هنگام وقوع زلزله در نزدیکی منبع لرزه‌زا (نزدیک گسل^۶، ارتعاشات به وجود آمده زمان کمی برای میرا شدن دارند، بنابراین این تحریکات بسیار شدیدتر از تحرکاتی هستند که در فاصله دورتر از منبع لرزه‌زا (دور از گسل)^۷ اتفاق می‌افتد.

۱-۲-۱- محدوده نزدیک گسل

مشخصات زلزله‌ها در نزدیکی گسل مسبب زمین‌لرزه به طور عمدتی با مشخصات زلزله‌های دور از گسل متفاوت است. محدوده نزدیک گسل معمولاً در فاصله‌ای کمتر از ۵۰ km از سطح گسل‌ش در نظر گرفته می‌شود، هر چند آیین‌نامه UBC ۹۷ [۱] این محدوده را کمتر از ۱۵ km می‌داند اما تحقیقات انجام شده آثار زلزله‌های حوزه نزدیک را تا فاصله ۶۰ km (بسته به بزرگی زلزله) گزارش کرده‌اند [۲]. در کاربرد واژه نزدیک گسل برای رکوردهای ثبت شده در این محدوده بایستی به مفهوم این واژه توجه شود، زیرا علاوه بر فاصله ایستگاه ثبت رکورد، مکانیزم گسل‌ش، جهت انتشار گسل‌ش، جابجایی پسماند ناشی از لغزش گسل و موقعیت قرارگیری ایستگاه ثبت رکورد نسبت به مسیر شکست گسل نیز دارای اهمیت است [۳, ۴]. این عوامل باعث ایجاد اثرات خاصی در رکوردهای زلزله‌های حوزه نزدیک می‌شوند.

⁶ Near-fault

⁷ Far-fault

۱-۳-۱- مشخصات زلزله‌های حوزه نزدیک

۱-۳-۱- اثر جهت‌گیری شکست^۸

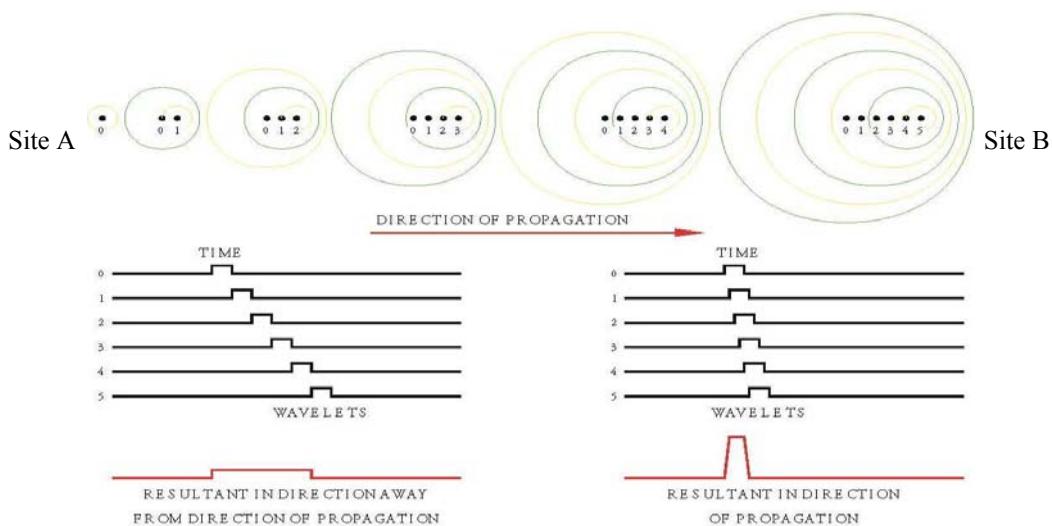
زمانی که یک گسل شروع به شکسته شدن می‌کند، شکست از نقطه‌ای روی امتداد گسل ایجاد شده و بسته به محل آغاز گسیختگی به ابتدای گسل، انتهای گسل یا هر دو جهت گسترش می‌یابد. به دلیل خواص امواج برشی حاصل از زلزله و تجمع بیشتر اثر امواج برشی در قسمت جلوی مسیر شکست، مشخصات زلزله‌های نزدیک گسل بیشتر در قسمت جلوی مسیر شکست گسل مشاهده می‌گردد. جهت‌گیری شکست پیش‌روندۀ^۹ هنگامی رخ می‌دهد که اولاً جبهه شکست به سمت سایت در حرکت باشد و ثانیاً جهت لغزش روی گسل به سمت سایت مورد نظر باشد. انتشار شکست گسل به سمت سایت با سرعتی تقریباً معادل سرعت امواج برشی (سرعت گسلش تقریباً نزدیک سرعت امواج برشی یعنی حدود 87 m/s است) باعث می‌شود که انرژی زلزله در یک زمان محدود و تحت یک پالس جابجایی بزرگ با پریود بالا به سازه وارد شود [۲]. این شرایط در زلزله‌هایی با مکانیزم امتداد لغز به خوبی مشاهده می‌شود.

در شکل ۱-۱ جهت انتشار شکست از چپ به راست است و شکست از نقطه ۱ نزدیک به Site A شروع و تا نقطه ۵ نزدیک به Site B ادامه می‌یابد. در این حالت در ساختگاه B اثر جهت‌گیری شکست پیش‌روندۀ و در ساختگاه A اثر جهت‌گیری شکست پیش‌روندۀ دیده می‌شود. همان طوری که در شکل مشاهده می‌شود انرژی زلزله در هر شکست در طول گسل متراکم شده و در نهایت با یک پالس ارتعاشی بزرگ همراه با موج برشی به سمت ساختگاه B پیش می‌رود. این گونه نگاشت‌ها معمولاً دارای مدت زمان کوتاه با یک پالس ویژه با دامنه زیاد و دوره تناوب متوسط تا بلند هستند. در زلزله‌های حوزه نزدیک ابتدا موج برشی و سپس شکست به سمت ساختگاه انتشار می‌یابد و این مساله باعث می‌شود در ابتدای نگاشت یک موج پالسی شکل افقی با دامنه زیاد در ابتدای ساختگاه در نزدیکی مرکز زمین‌لرزه باشد (Site A) و انتشار شکست به سمت دور شدن از ساختگاه

⁸ Rupture directivity

⁹ Forward rupture directivity

باشد، در این حالت اثر جهت‌گیری شکست پس‌رونده^{۱۰} رخ می‌دهد. زمین‌لرزه در حالت شکست پس‌رونده دارای مدت زمان بیشتر و پالس‌های متعدد با دوره تناوب کوتاه و دامنه کوچک بوده، به طوری که انرژی زلزله در طول مدت ارتعاش پراکنده می‌شود [۲]. اگر فاصله ساختگاه از منشا زلزله زیاد باشد و ساختگاه خارج از محدوده جهت‌گیری شکست قرار گرفته باشد، در این حالت زلزله‌هایی با جهت‌گیری خنثی^{۱۱} یا دور از گسل را خواهیم داشت. شکل ۱-۲ نقشه ناحیه لندرز^{۱۲} و موقعیت شکست ناشی از زلزله لندرز (۱۹۹۲) را نشان می‌دهد که در سه بخش از گسل اتفاق افتاده است. همان طور که در رکورد سرعت ثبت شده در جهت‌گیری شکست پیش‌رونده در این شکل مشاهده می‌شود، یک پالس بزرگ سرعت در ایستگاه لاسرن^{۱۳} نمایان است. در شکل ۱-۳ رکوردهای ثبت شده در زلزله لندرز (۱۹۹۲) در دو محدوده مربوط به جهت‌گیری شکست پیش‌رونده (ایستگاه لاسرن) و جهت‌گیری شکست پس‌رونده (ایستگاه جوشوا^{۱۴}) به ترتیب نشان داده شده است.



شکل ۱-۱- اثرات ناشی از جهت‌گیری شکست برای ساختگاه A و B [۵].

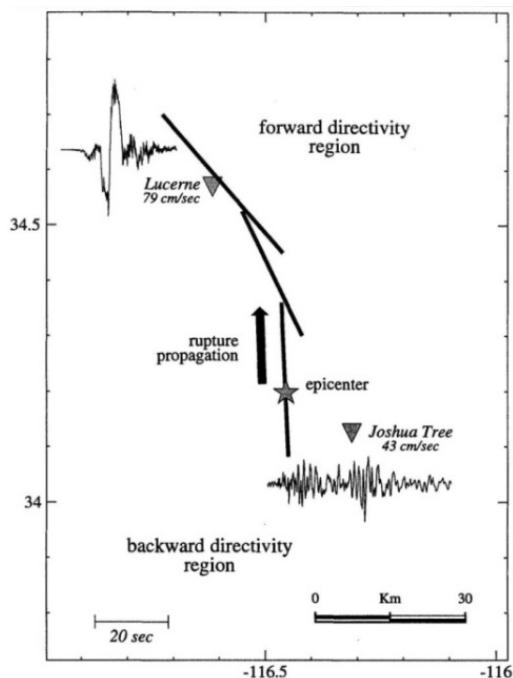
¹⁰ Backward rupture directivity

¹¹ Neutral directivity

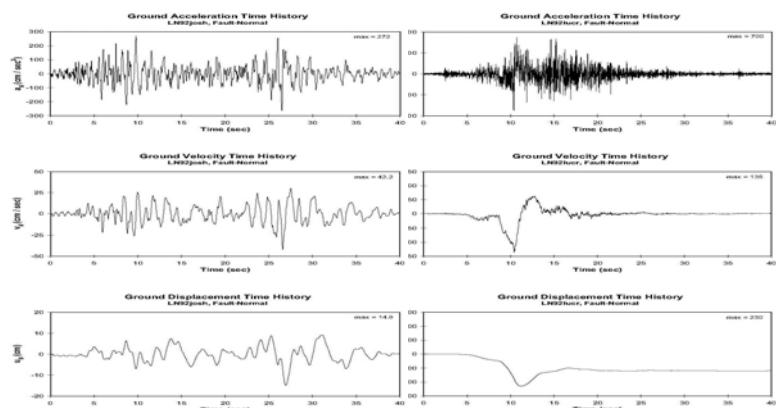
¹² Landers

¹³ Lucerne

¹⁴ Joshua



شکل ۱-۲- نقشه ناحیه لندرز و موقعیت شکست ناشی از زمین لرزه لندرز (۱۹۹۲) و اثر جهت‌گیری شکست در رکورد سرعت ثبت شده در جهت‌گیری شکست پیش‌رونده و پس‌رونده [۳].

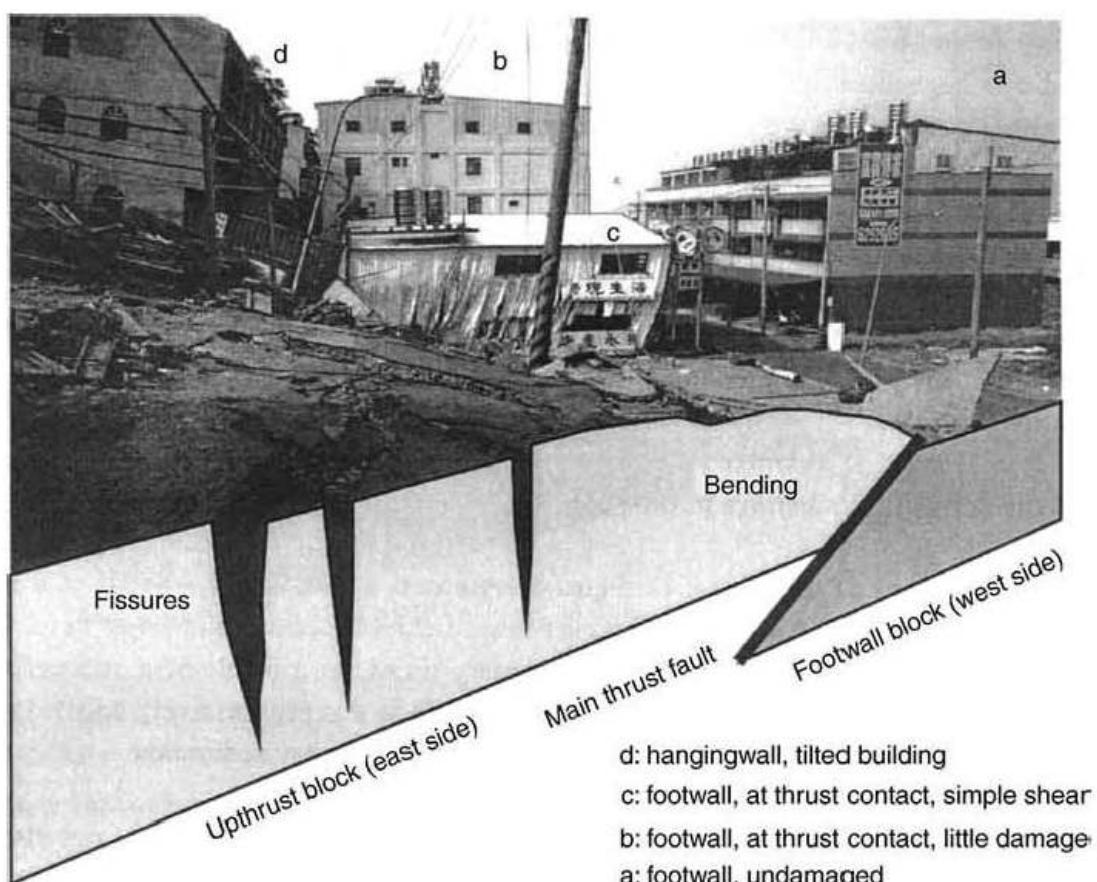


(الف) (ب)

شکل ۱-۳- تاریخچه زمانی شتاب، سرعت و جابجایی زمین لرزه لندرز (۱۹۹۲)؛ (الف) در محدوده جهت‌گیری شکست پیش‌رونده؛ (ب) در محدوده جهت‌گیری شکست پس‌رونده [۶].

شکل ۱ - ۴ خرابی ناشی از گسل فشاری چلانگپو^{۱۵} (گسل مسبب زلزله چی-چی تایوان) را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود خرابی در فرا دیواره^{۱۶} (که در مسیر جهت‌گیری شکست پیش‌روندۀ گسل قرار دارد) بیشتر از خرابی به وجود آمده در فرو دیواره^{۱۷} (که در مسیر جهت‌گیری پس‌روندۀ شکست قرار دارد) است.

بنابراین زمانی که واژه رکورد نزدیک گسل مورد استفاده قرار می‌گیرد، منظور رکوردهایی هستند که علاوه بر آن که ایستگاه ثبت رکورد در فاصله نزدیکی نسبت به مرکز زلزله قرار گرفته است، موقعیت قرارگیری ایستگاه ثبت رکورد نیز در مسیر جهت‌گیری شکست پیش‌روندۀ باشد.



شکل ۱ - ۴ - خرابی ناشی از گسل فشاری چلانگپو (گسل مسبب زلزله چی-چی تایوان) [۷].

¹⁵ Chelungpu

¹⁶ Upthrust

¹⁷ Footwall

۱-۳-۲- اثر گام جهشی^{۱۸}

در زمین لرزه‌های حوزه نزدیک جابجایی‌های ماندگار ناشی از تغییر شکل ثابت زلزله دیده می‌شود که به این تغییر مکان‌ها، گام جهشی می‌گویند. حرکات پالسی می‌توانند توسط جابجایی‌های دائمی زمین ناشی از این گام‌های جهشی نیز تولید شوند که این گونه پالس‌ها با پالس‌های ناشی از جهت‌گیری شکست متفاوت هستند. جهت‌گیری شکست یک پدیده دینامیکی است که در اکثر موارد جابجایی دائم ایجاد نمی‌کند، بنابراین رکورد سرعت آن حاوی پالس‌های دو جهته است در حالی که گام جهشی در دارای رکورد سرعت با پالس یک طرفه بوده که حاصل آن جابجایی دائم زمین است. گام جهشی در فواصل زمانی مجزا در چند ثانیه در طی لغزش گسل رخ می‌دهد. تغییر مکان‌های گام جهشی در جهت لغزش گسل (عمود بر اثر جهت‌گیری شکست) است از این رو به طور عمده با جابجایی‌های دینامیکی ناشی از اثرات جهت‌گیری شکست ترکیب نمی‌شوند. در گسلش شیب لغز (شکل ۱-۵-الف) مولفه پالس ناشی از جهت‌گیری شکست، عمود بر صفحه لغزش گسل و تغییر مکان ناشی از گام جهشی، در امتداد موازی با لغزش گسل رخ می‌دهد. در گسل‌های امتداد لغز (شکل ۱-۵-ب)، پالس ناشی از جهت‌گیری شکست، در جهت عمود بر لغزش گسل بوده و تغییر مکان ناشی از گام جهشی، در جهت موازی با لغزش گسل رخ می‌دهد [۲].

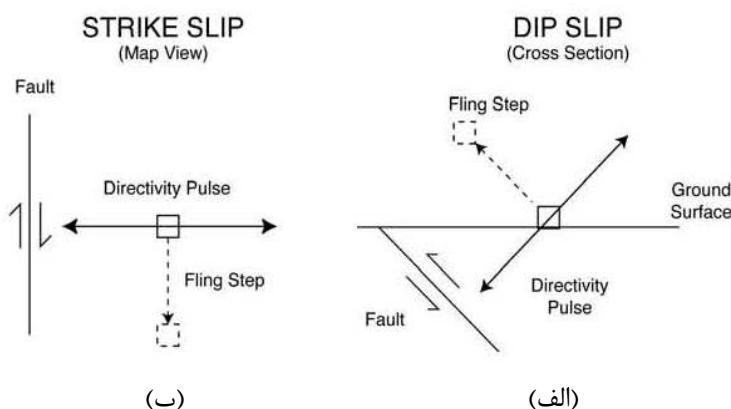
در شکل ۱-۶ تاریخچه زمانی جابجایی مربوط به دو نوع گسلش شیب لغز و امتداد لغز نشان داده شده است. در شکل ۱-۶-الف دو مولفه عمود بر گسل^{۱۹} و موازی گسل^{۲۰} مربوط به زلزله امتداد لغز نشان داده شده است. در شکل سمت چپ که مربوط به مولفه عمود بر گسل است، پالس ناشی از جهت‌گیری شکست همان طوری که در شکل ۱-۵-ب نشان داده شد، برای مولفه عمود بر گسل مشاهده می‌شود ولی جابجایی ماندگار زمین وجود ندارد در حالی که در شکل سمت راست که مربوط به مولفه موازی گسل است پالسی مشاهده نمی‌شود و فقط جابجایی ماندگار زمین به همراه نوسانات دینامیکی ضعیف زمین دیده می‌شود. چنان‌چه جابجایی ماندگار زمین یا همان اثر گام جهشی را از مولفه موازی گسل حذف نماییم جنبش دینامیکی ضعیفی در تاریخچه زمانی جابجایی باقی می‌ماند. بنابراین در زلزله‌های امتداد لغز حرکات ماندگار زمین و پالس‌های ناشی از اثر جهت‌گیری با هم جمع

¹⁸ Fling step

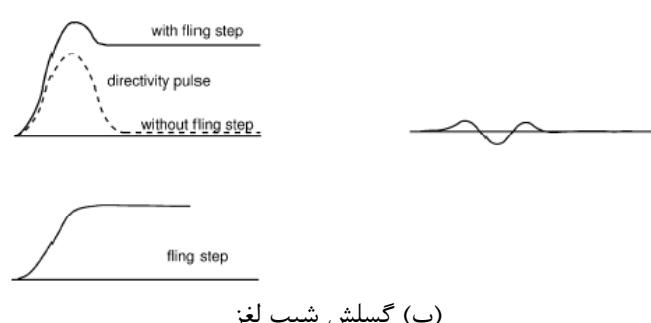
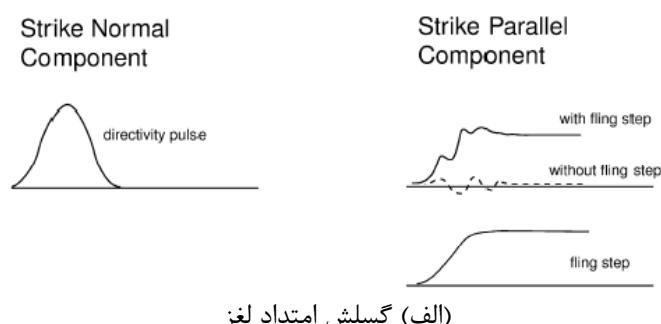
¹⁹ Strike Normal Component

²⁰ Strike Parallel Component

نمی‌شوند زیرا در راستاهای مختلفی رخ می‌دهند [۲]. خلاف این وضعیت در شکل ۱-۶-ب که دو مولفه عمود بر گسل و موازی گسل مربوط به زلزله شیب لغز نشان داده شده است، مشاهده می‌شود. در شکل سمت راست که مربوط به مولفه موازی گسل است فقط حرکات دینامیکی ضعیف زمین دیده می‌شود در حالی که در شکل سمت چپ اثر جابجایی ماندگار ناشی از گام جهشی و همچنین پالس ناشی از اثر جهتگیری به صورت همزمان وارد شده است که نشان می‌دهد در گسلش شیب لغز هر دو اثر با هم ترکیب می‌شوند و این ترکیب در مولفه عمود بر گسل به خوبی نمایان می‌گردد [۲].



شکل ۱-۵- جهت پالس ناشی از جهتگیری شکست و تغییر مکان ماندگار ناشی از گام جهشی؛ (الف) گسلش شیب لغز (مقطع عرضی گسل)، (ب) گسلش امتداد لغز (پلان گسل) [۲].



شکل ۱-۶- نمودار شماتیک تاریخچه زمانی جابجایی که در آن پالس مربوط به گام جهشی و جهتگیری شکست به صورت جداگانه و ترکیبی نشان داده شده است. (الف) گسلش امتداد لغز؛ (ب) گسلش شیب لغز [۲].

۱-۳-۳- اثر مولفه قائم زلزله در زلزله‌های حوزه نزدیک

لرزش قائم زمین به واسطه امواج فشاری P و امواج برشی S است. چنان‌چه جابجایی گسل صرفاً افقی باشد، امواج برشی ایجاد شده از نوع امواج برشی افقی هستند و چنان‌چه جابجایی گسل صرفاً قائم باشد، امواج برشی ایجاد شده از نوع امواج برشی قائم است. از آنجا که جابجایی گسل ترکیبی از جابجایی افقی و قائم است لذا امواج برشی افقی و عمودی همواره وجود دارند. تحقیقات نشان داده که غالب ارتعاشات قائم زمین متعلق به امواج P است مگر آن که ایستگاه لرزه نگاری بسیار نزدیک به گسل باشد و گسل نیز از نوع نرمال و یا معکوس باشد که در این صورت غالب ارتعاش قائم متعلق به امواج برشی قائم است. این مولفه با دور شدن از منبع زلزله با سرعت بیشتری نسبت به مولفه افقی زلزله کاهش می‌یابد. مولفه قائم زلزله در سطح زمین دارای محتوای فرکانسی بزرگ در فرکانس‌های بالا است [۷]. بزرگ‌نیا^{۲۱} و برتره^{۲۲} با اندازه‌گیری فرکانس قائم ۱۲ ساختمان نشان دادند که پریود اصلی قائم این ساختمان‌ها بین ۰/۰۷۶ و ۰/۰۲۶ ثانیه است [۷]. این مقادیر نشان می‌دهد که دوره تناوب قائم ساختمان‌ها معمولاً کوتاه است و دقیقاً نزدیک به فرکانس ارتعاشات قائم زلزله‌های حوزه نزدیک در سطح زمین است.

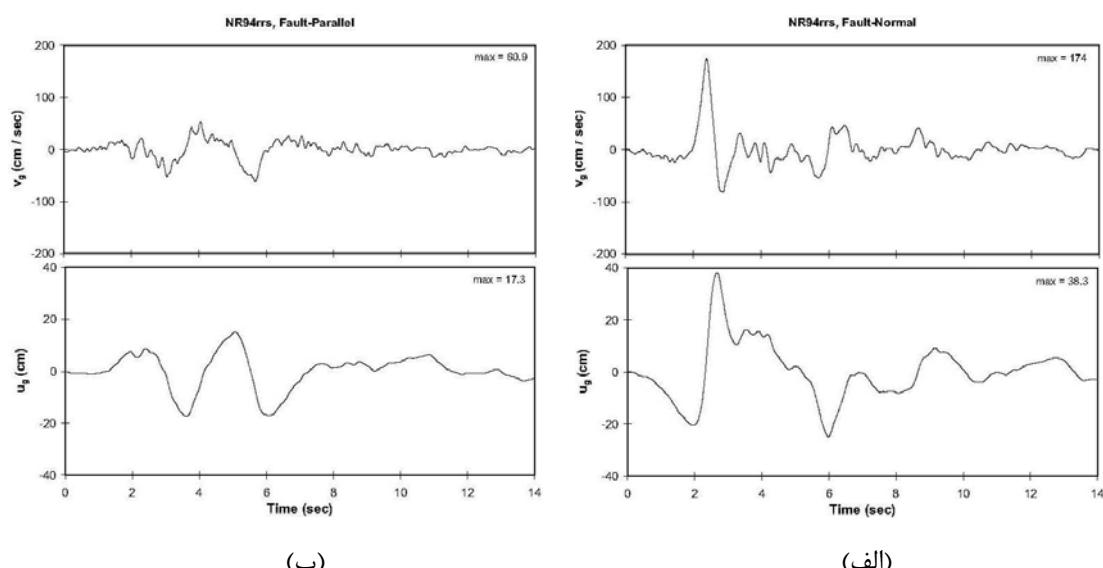
۱-۴-۳- مولفه‌های رکورد زلزله‌های حوزه نزدیک

جنبیش زمین هنگام وقوع زلزله توسط شتاب نگاشتهای تعییه شده در ایستگاه‌های اندازه‌گیری در سه جهت متعامد (دو مولفه در امتداد افقی و یکی در امتداد قائم) ثبت می‌گردد، که یکی از مولفه‌های افقی موازی امتداد گسل و دیگری عمود بر امتداد گسل است. در رکوردهای ثبت شده جنبیش زمین در فاصله‌های دور از گسل این دو مولفه از رکوردها معمولاً شبیه به هم بوده و مقادیر بیشینه شتاب، سرعت و جابجایی‌های مربوط بر هر دو مولفه تقریباً برابر است ولی از آنجایی که تجمع آثار اکثر امواج برشی در قسمت مسیر شکست پیش‌روندۀ متمایل به سمت محوری عمود بر مسیر گسل است و به دلیل الگوی شعاعی جابجایی برشی گسل، در رکوردهای نزدیک گسل، مولفه عمود بر گسل از مقادیر

²¹ Bozorgnia

²² Bertero

بزرگ‌تری برای بیشینه شتاب^{۲۳} (PGA)، بیشینه سرعت^{۲۴} (PGV) و بیشینه جابجایی^{۲۵} (PGD) نسبت به مولفه موازی با گسل برخوردار است. تاریخچه زمانی سرعت و جابجایی زلزله نورثridج -۷-۱ (۱۹۹۴) در مسیر شکست پیش‌روندۀ در شکل ۱-۷-الف برای مولفه عمود بر گسل و در شکل ۱-۷-ب برای مولفه موازی گسل نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود مقادیر سرعت و جابجایی مولفه عمود بر گسل بسیار بزرگ‌تر از مولفه موازی گسل برای یک زلزله مشخص است و اثرات پالس‌گونه در رکوردهای سرعت و جابجایی مولفه عمود بر گسل کاملاً مشهود است.



شکل ۱-۷- تاریخچه زمانی سرعت و جابجایی رکورد زلزله نورثridج (۱۹۹۴)؛ (الف) مولفه عمود بر گسل (مولفه نرمال)؛ (ب) مولفه موازی گسل [۶].

۱-۳-۵- اثر پالس‌گونه با پریود بلند

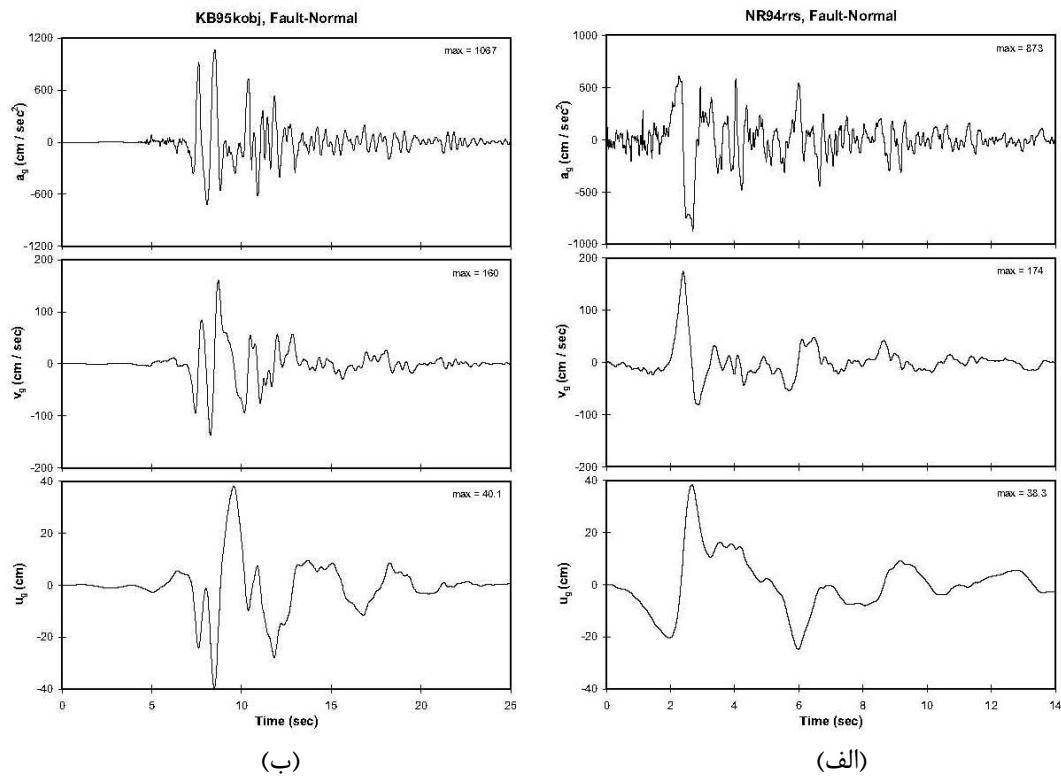
همان طوری که در بخش قبل اشاره شد، به دلیل تجمع بیشتر اثر امواج برشی در قسمت جلوی مسیر شکست گسل، زمانی که شکست با سرعتی نزدیک به سرعت امواج برشی به سمت ایستگاه و یا سایت انتشار می‌یابد باعث به وجود آمدن یک حرکت پالس‌گونه با پریود بلند در ابتدای رکودهای ثبت شده در ایستگاه‌های نزدیک گسل می‌گردد. شکل ۱-۸ تاریخچه زمانی شتاب، سرعت و جابجایی رکودهای ثبت شده در نزدیک گسل مربوط به زمین‌لرزه‌های نورثridج (۱۹۹۴) و کوبه (۱۹۹۵) را

²³ Peak ground acceleration (PGA)

²⁴ Peak ground velocity (PGV)

²⁵ Peak ground displacement (PGD)

نشان می‌دهد. با توجه به این شکل‌ها، حرکت پالس‌گونه در ابتدای رکوردهای ثبت شده در نزدیکی گسل به وضوح قابل تشخیص است.



شکل ۱-۸- تاریخچه زمانی شتاب، سرعت و جابجایی رکوردهای ثبت شده در نزدیک گسل؛ (الف) زمین‌لرزه نورثریدج (۱۹۹۴)، (ب) زمین‌لرزه کوبه (۱۹۹۵) [۶].

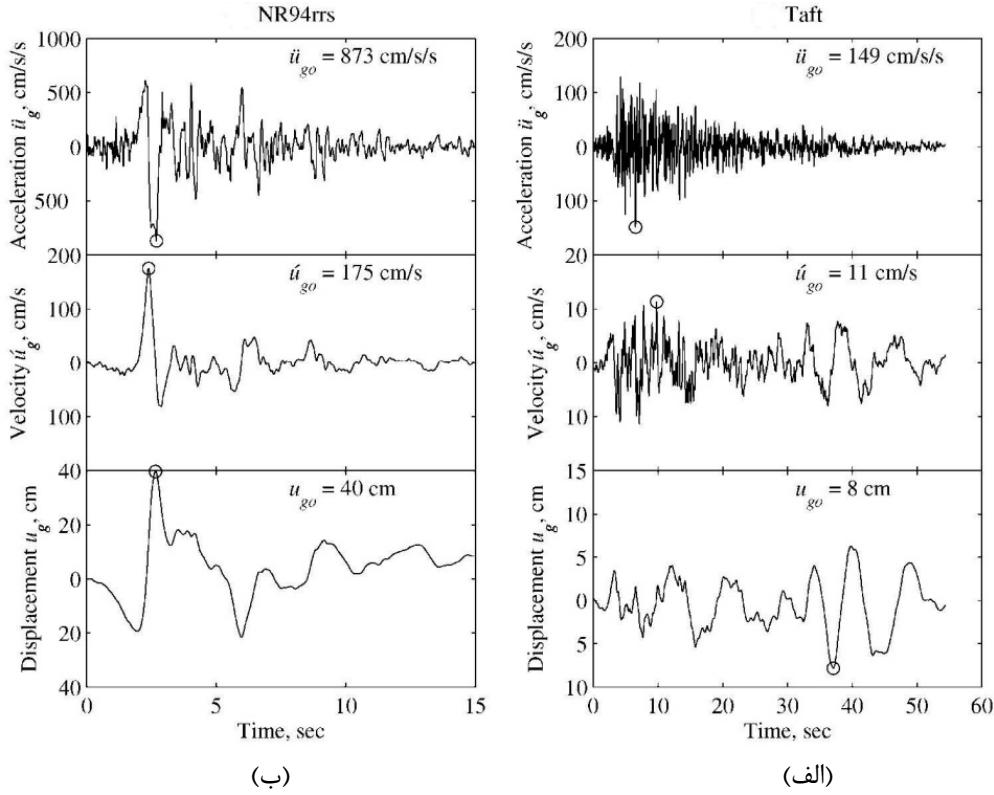
۱-۳-۶- مقادیر بالای بیشینه شتاب، سرعت و جابجایی

یکی دیگر از مشخصات مهم رکوردهای نزدیک گسل وجود مقادیر بالای PGA، PGV و PGD نسبت به رکوردهای دور از گسل است. هر قدر به رو مرکز زلزله^{۲۶} نزدیک‌تر شویم مقادیر PGA و PGV افزایش می‌یابد [۸]. وجود مقادیر بالای بیشینه شتاب، سرعت و جابجایی جنبش زمین در رکوردهای نزدیک گسل باعث بروز خرابی و خسارت بالا در سازه‌های قرار گرفته در محدوده نزدیک گسل مخصوصاً در امتداد عمود بر گسل می‌گردد. شکل ۱-۹ نگاشتهای شتاب، سرعت و جابجایی زمین‌لرزه‌های نورثریدج و تفت^{۲۷} را نشان می‌دهد. زمین‌لرزه نورثریدج با ویژگی‌های رکوردهای نزدیک گسل دارای مقادیر PGA، PGV و PGD بزرگ‌تری نسبت به زلزله تفت است که دارای ویژگی‌های

²⁶ Epicenter

²⁷ Taft

رکوردهای نزدیک گسل نمی‌باشد [۹]. علاوه بر آن نسبت PGV/PGA نیز در رکوردهای نزدیک گسل مقادیر بزرگ‌تری در مقایسه با رکوردهای دور از گسل دارد.



شکل ۱-۹- تاریخچه زمانی شتاب، سرعت و جابجایی؛ (الف) زلزله دور از گسل تفت؛ (ب) زلزله نزدیک گسل نورثridج [۹].

۱-۳-۷- انتقال انرژی در مدت زمان کوتاه و اعمال نیروی ضربه‌گونه به سازه‌ها

تجمع بیشتر اثر امواج برشی در مسیر شکست پیش‌رونده گسل و حرکت پالس‌گونه در ابتدای رکوردها موجب اعمال انرژی زیاد در محدوده شکست پیش‌رونده می‌شود. به علت اعمال مقادیر زیاد انرژی به سازه توسط پالس‌های موجود در تاریخچه زمانی حرکت در ابتدای رکورد در مدت زمان کوتاه، توزیع رفتار غیرخطی سازه دگرگون می‌شود. به طوری که به جای توسعه رفتار غیرخطی و مفاصل پلاستیک در ارتفاع سازه، انرژی ناشی از زلزله در اولین مفاصل ایجاد شده جذب می‌گردد و توزیع و توسعه رفتار غیرخطی در تمام مفاصل سازه مشاهده نمی‌شود. در نتیجه، رفتار مناسبی در مقابل نیروهای وارد در اثر زلزله‌های نزدیک گسل در سازه‌ها مشاهده نمی‌شود. در واقع ایده‌آل ترین رفتار سازه در برابر نیروهای جانبی ناشی از زلزله رفتاری است که کل سازه با وارد شدن به ناحیه غیرخطی رفتاری الاستوپلاستیک نشان داده و با تغییر شکل‌های مناسب امکان جذب انرژی بیشتری را داشته باشد که

این امر در سازه‌هایی که تحت اثر نیروی زلزله‌های نزدیک گسل قرار دارند، به دلیل حرکت پالس‌گونه (اعمال نیرو به صورت ضربه‌ای) به وجود نمی‌آید. در واقع به علت وجود پالس‌های مشخص در رکورد زلزله‌های نزدیک گسل، پاسخ سازه از حالت مودگونه^{۲۸} که در آن یک یا چند مود تعیین کننده پاسخ نهایی سازه است، خارج شده و به صورت موج گونه^{۲۹} در می‌آید. در این حالت پاسخ سازه توسط جمع اثر امواج گذرنده از سازه تعیین می‌شود.

۱-۴-۳- ضوابط آیین‌نامه‌ای برای لحاظ نمودن اثرات حوزه نزدیک

با توجه به تاثیرات قابل توجه زلزله‌های حوزه نزدیک بر رفتار سازه لازم است این تاثیرات در ضوابط آیین‌نامه‌ای منظور گردد. این در حالی است که اکثر آیین‌نامه‌ها به این اثرات توجه چندانی ندارند. در ادامه آیین‌نامه‌هایی که این تاثیرات را مد نظر قرار داده‌اند مورد بررسی قرار گرفته و به چگونگی لحاظ کردن اثرات رکوردهای نزدیک گسل در این آیین‌نامه‌ها اشاره می‌شود.

۱-۴-۱- آیین‌نامه UBC97 [۱]

بعد از زلزله نورث‌ریدج (۱۹۹۴) خصوصیات متفاوت و آسیب‌های بیشتر زلزله‌های حوزه نزدیک نسبت به زلزله‌های دیگر به طور ویژه مورد توجه محققین قرار گرفت و در ویرایش سال ۱۹۹۷ آیین‌نامه UBC، علاوه بر تغییرات ایجاد شده در سایر قسمت‌های آیین‌نامه تغییراتی نیز در زمینه تعیین مقدار نیروی برش طراحی در مناطق نزدیک گسل برای منظور کردن حرکات تشدید شده توسط کمیته تخصصی SEAOC گنجانده شد. بر این اساس ضرایبی برای اعمال آثار زلزله‌های نزدیک گسل با مقادیر بزرگ‌تر از یک در تعیین مقدار نیروی جانبی در سطح طراحی برای مناطق نزدیک گسل (Zone 4) ارائه شده است. این ضرایب نیروی برش پایه طراحی را بر مبنای فاصله از رخ نمود سطحی گسل تشدید می‌نماید. آیین‌نامه UBC97 برای تعیین اثرات زمین‌لرزه طرح در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها، یک طیف طرح الاستیک ارائه نموده است. این آیین‌نامه خاک‌ها را با توجه به خصوصیات لرزه‌ای و نوع رفتار لرزه‌ای آن‌ها به ۶ دسته تقسیم بندی می‌کند. نواحی و مناطق مختلف با توجه به میزان خطر

²⁸ Modlike

²⁹ Wavelike

لرزه خیزی به ۵ دسته تقسیم بندی می‌شوند که عبارتند از: Zone 1 و Zone 4. بیشترین خطر لرزه‌ای مربوط به Zone 4 و کمترین آن مربوط به Zone 1 است. در این آیین‌نامه برای محاسبه نیروی برش پایه طراحی به شیوه استاتیکی، از فرمول‌ها و روابط زیر استفاده می‌شود:

$$V = \frac{C_V I}{R T} W \quad (1-1)$$

$$0.11 C_a I \leq V \leq 2.5 \frac{C_a I}{R} W \quad (2-1)$$

در روابط فوق V برش پایه کل، W وزن موثر لرزه‌ای، I ضریب اهمیت، R ضریب رفتار و T زمان تناوب اصلی الاستیک ساختمان می‌باشند. C_a و C_V ضرایب لرزه‌ای هستند. در ناحیه لرزه خیزی Zone 4، مقدار برش پایه طراحی نباید کمتر از مقدار زیر باشد:

$$V = \frac{0.8 Z N_V I}{R} W \quad (3-1)$$

که در آن Z ضریب منطقه‌ای زلزله بوده و N_V مربوط به لحاظ نمودن اثرات نزدیکی به گسل در ناحیه سرعت ثابت است که برای Zone 4 بر اساس نوع منبع (A, B, C) و نزدیکترین فاصله از منبع لرزه‌ای تعیین می‌شود. با توجه به نوع منبع لرزه‌ای در Zone 4 در فواصل خاصی مقدار ضرایب N_a و N_V برابر یک اختیار می‌گردد که به معنی عدم تأثیر اثرات نزدیک گسل است (جدول ۱ - ۱ و جدول ۳ - ۱).

جدول ۱ - ۱ - مقادیر پارامتر N_a با لحاظ نمودن منابع مختلف لرزه‌ای [۱]

نوع منبع لرزه‌ای	نزدیکترین فاصله تا منبع لرزه‌ای شناخته شده		
	$\leq 2 \text{ km}$	5 km	$\geq 10 \text{ km}$
A	۱/۵	۱/۲	۱
B	۱/۳	۱	۱
C	۱	۱	۱

جدول ۱ - ۲ - مقادیر پارامتر N_V با لحاظ نمودن منابع مختلف لرزه‌ای [۱]

نوع منبع لرزه‌ای	نزدیکترین فاصله تا منبع لرزه‌ای شناخته شده			
	$\leq 2 \text{ km}$	5 km	10 km	$\geq 15 \text{ km}$
A	۲	۱/۶	۱/۲	۱
B	۱/۶	۱/۲	۱	۱
C	۱	۱	۱	۱

۱-۴-۲- آیین‌نامه تایوان [۱۰]

پس از زلزله چی-چی (۱۹۹۹) طیف پاسخ طراحی هم پایه شده‌ای برای ساختگاه‌های نزدیک گسل بر اساس آیین‌نامه موجود طراحی لزرهای تایوان و توابع کاهندگی نزدیک گسل، برای نیازهای مقاومتی به دست آمده از حرکات زلزله چی-چی (۱۹۹۹) توسعه یافت. آیین‌نامه تایوان برای توسعه روش‌های طراحی سازه در برابر حرکات نزدیک گسل زمین به دو روش عمل می‌نماید. در روش اول نیاز لرزه‌ای حرکات نزدیک گسل در سطح طراحی در نظر گرفته می‌شود و طیف پاسخ طراحی حرکات نزدیک گسل برای تشدييد ظرفيت مقاومتی سازه‌ها بسط داده می‌شود. در روش دوم که روش طراحی دو-تراز ناميده می‌شود، اثرات نزدیک گسل در سطح نيروي پایه طراحی در نظر گرفته نمي‌شود لیکن برای محدود کردن ظرفيت نهايی سازه‌ها يك ظرفيت اضافي کنترلي لازم است تا تحت حرکات نزدیک گسل، ظرفيت نهايی بر نیاز لرزه‌ای فزونی یابد.

۱-۵- طراحی لرزه‌ای سازه‌ها و اثر زلزله‌های حوزه نزدیک بر آن

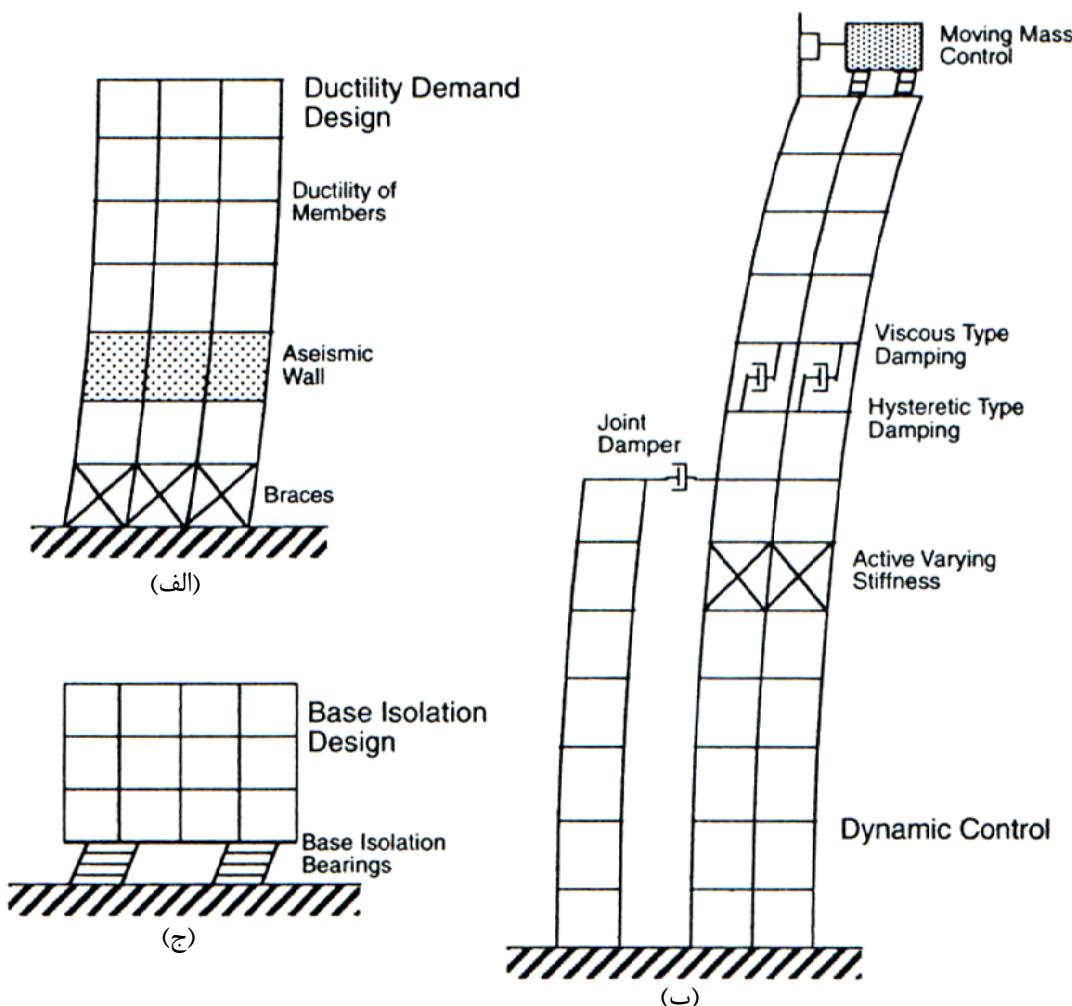
طراحی لرزه‌ای سازه‌ها با هدف تأمین ايمني افراد و حفظ عملکرد سازه‌ها در برابر زلزله‌های شدید از اهميت بالايی برخوردار است. مفاهيم مختلف برای نيل به اين هدف را در بعد طراحی می‌توان به سه دسته تقسيم بندي نمود که به صورت شماتيک در شكل ۱-۱۰ نشان داده شده است [۱۱]. اين سه دسته عبارتند از: طراحی متداول، طراحی با استفاده از سистем‌های کنترلي و طراحی با استفاده از سистем‌های جداسازی پایه. در اين بخش ابتدا توضیح مختصری راجع به هر يك از روش‌های طراحی مذکور داده شده و در ادامه تحقیقات انجام شده در خصوص عملکرد آن‌ها در مواجهه با زلزله‌های حوزه نزدیک مورد بررسی قرار می‌گيرد.

۱-۵-۱- طراحی متداول

اين دسته شامل سистем‌های متداول سازه‌ای (سيستم قاب خمشي، سيستم مهاربندی جانبي، دیوار برشی و سیستم‌های دوگانه) است و هدف طراحی به حداقل رساندن آسیب‌های سازه‌ای و غير سازه‌ای

طی زلزله‌های خفیف و متوسط و حفظ ایستایی سازه در زلزله‌های شدید با تلفات جانی حداقل است.

دستیابی به این امر در نتیجه اتلاف انرژی توسط اعضای اصلی سازه‌ای تحقق می‌یابد.



شکل ۱-۱۰- مدل شماتیک؛ (الف) طراحی متداول؛ (ب) کنترل پاسخ دینامیکی؛ (ج) جداسازی پایه [۱۱].

۱-۵-۲- طراحی با استفاده از سیستم‌های کنترلی

این دسته شامل روش‌های کنترل پاسخ دینامیکی است که معمولاً^{۳۰} با هدایت انرژی ورودی به سیستم کنترلی باعث کاهش پاسخ سازه‌ای شده که در نتیجه استفاده از این سیستم‌ها عملکرد سیستم سازه‌ای بهبود می‌یابد. این سیستم‌ها به سه دسته اصلی تقسیم بندی می‌شوند که شامل: سیستم‌های کنترل غیرفعال^{۳۱}، سیستم‌های کنترل فعال^{۳۱} و سیستم‌های کنترل نیمه فعال^{۳۲} می‌شوند.

^{۳۰} Passive control systems

^{۳۱} Active control systems

الف) سیستم‌های کنترل غیرفعال

سیستم کنترل غیرفعال به سیستمی اطلاق می‌شود که نیازی به منع انرژی خارجی برای کار کردن ندارد و از حرکات سازه برای تولید نیروی کنترلی استفاده می‌نماید. نیروی کنترلی تولید شده تابعی از پاسخ سازه در محل نصب سیستم کنترلی است.

ب) سیستم‌های کنترل فعال

سیستم کنترل فعال به سیستمی اطلاق می‌شود که نیازی به یک منبع انرژی بزرگ برای به کار انداختن یک محرک الکتروهیدرولیکی یا الکترومکانیکی که نیروی کنترلی را تامین می‌کند، دارد. نیروی کنترلی بر اساس بازخورد سنسورهایی که تحریکات زلزله و یا پاسخ سازه را اندازه‌گیری می‌کنند، تولید می‌شود. بازخوردهای پاسخ سازه‌ای ممکن است در موقعیت‌هایی غیر از محل نصب سیستم کنترل فعال اندازه‌گیری شوند.

ج) سیستم‌های کنترل نیمه فعال

سیستم کنترل نیمه‌فعال به سیستمی اطلاق می‌شود که معمولاً به یک منبع انرژی خارجی کوچک (مثلاً یک باتری) برای کار کردن احتیاج دارد و از حرکات سازه برای تولید نیروی کنترلی استفاده می‌نماید. اندازه این نیروی تولید شده می‌تواند با استفاده از منبع انرژی خارجی کنترل شود. نیروی‌های کنترلی بر اساس بازخورد سنسورهایی تولید می‌شوند که تحریکات زلزله و یا پاسخ سازه را اندازه‌گیری می‌کنند. بازخوردهای پاسخ سازه‌ای ممکن است در موقعیت‌هایی غیر از محل نصب سیستم کنترل نیمه‌فعال اندازه‌گیری شوند.

بعضی اوقات سیستم‌های کنترلی سه‌گانه ذکر شده در فوق با یکدیگر ترکیب شده و سیستمی را به وجود می‌آورند که سیستم کنترل هیبریدی^{۳۲} نامیده می‌شود. سیستم‌های کنترل هیبریدی شامل ترکیبی از تجهیزات کنترل غیرفعال و فعال و یا ترکیبی از تجهیزات کنترل غیرفعال و نیمه‌فعال می‌باشند [۱۲].

^{۳۲} Semiactive systems

^{۳۳} Hybrid control system

۱-۵-۳- طراحی با استفاده از سیستم‌های جداسازی پایه

سیستم‌های جداسازی پایه در واقع فرم خاصی از سیستم‌های کنترل غیرفعال هستند [۱۲]. این سیستم‌ها، به دلیل سختی افقی پایینی که بین سازه و پی ایجاد می‌کنند، ساختمان و یا سازه را از مولفه‌های افقی حرکت زمین جدا می‌نمایند [۱۵]. این عمل، سیستمی را به وجود می‌آورد که فرکانس پایه آن بسیار پایین‌تر از فرکانس‌های غالب زمین‌لرزه و نیز فرکانس پایه همان ساختمان بدون سیستم جداساز است. در نخستین مود دینامیکی سازه جداسازی شده، تغییر شکل فقط در سیستم جداساز به وجود می‌آید و روسازه به صورت صلب رفتار می‌کند. مودهای بالاتر که باعث ایجاد تغییر شکل در سازه می‌شوند بر مود اول و در نتیجه حرکت زمین عمودند. این مودهای بالا در حرکت تأثیر ندارند و انرژی زیاد زلزله در مودهای بالا به سازه منتقل نمی‌گردد. برای جلوگیری از وقوع احتمالی پدیده تشدید در محدوده فرکانسی برابر با فرکانس تشدید سیستم جداساز، استفاده از مقدار مشخصی میرایی مفید و ضروری است [۱۳]. سیستم‌های جداسازی پایه دارای محدودیت‌های کاربردی هستند. برخی از این محدودیت‌ها عبارتند از: عملکرد نامناسب این سیستم‌ها در ساختمان‌های بلند، رفتار نامناسب این سیستم‌ها در زمین‌لرزه‌ایی با پریود بلند یا ساختمان‌هایی که بر روی خاک نرم قرار دارند و محدودیت وزنی سازه‌های واقع بر روی این سیستم‌ها. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که سیستم جداسازی پایه‌ای به تنها‌ی قادر به محافظت ساختمان‌ها در برابر زلزله‌های نزدیک حوزه نزدیک نمی‌باشد [۱۴]. همچنین عملکرد سیستم‌های جداساز لرزه‌ای تحت زلزله‌های نزدیک گسل به دلیل تغییر شکل‌های بسیار بزرگ زمین که ناشی از اثر گام جهشی در زلزله‌های نزدیک گسل است، دچار اخلال می‌شود. علاوه بر این به دلیل بزرگ بودن مولفه قائم زلزله‌های نزدیک گسل نسبت به زلزله‌های دور از گسل، عملکرد سیستم‌های جداساز لرزه‌ای با مشکل مواجه می‌شود.

۱-۵-۴- اثر زلزله‌های حوزه نزدیک بر روی سیستم‌های متداول ساختمانی

رفتار و عملکرد سازه‌ها در معرض زلزله‌های حوزه نزدیک توسط محققین مختلفی مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور اثرات زلزله‌های حوزه نزدیک بر روی سیستم‌های متداول ساختمانی با مشخصات متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. در این بخش به بررسی تحقیقات مرتبط انجام شده در این خصوص پرداخته می‌شود.

تئوری انتشار امواج برای مطالعه پاسخ یک سازه برشی پیوسته تحت تحریک پالس مانند زمین توسط هال^{۳۴} و همکاران به کار گرفته شده است [۱۵، ۱۶]. پارامترهای آزمایش شده در این گزارش شامل مقاومت تسلیم صالح، ترک جوش، مدل کردن دال طبقات و مولفه عمودی حرکت زمین بود. در این گزارش دو ساختمان ۶ و ۲۰ طبقه تحت اثر شتاب نگاشت بیمارستان اولیویو^{۳۵} در زلزله نورثریدج (۱۹۹۴) آنالیز شد. این تحقیق نشان داد تنش غیر ارجاعی عموماً در تیرها به وجود می‌آید ولی تسلیم در ستون‌ها نیز به میزان قابل توجهی اتفاق می‌افتد. میزان جابجایی نسبی در ساختمان ۶ طبقه، ۶٪ و در ساختمان ۲۰ طبقه، ۴٪ به دست آمد. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که سطح نیروهای طراحی آیین‌نامه برای زمین‌لرزه‌های نزدیک گسل باید افزایش یابد.

رفتار دو ساختمان ۶ و ۲۰ طبقه که بر اساس آیین‌نامه ۹۴ UBC و مقررات رایج ژاپن طرح شده بودند توسط هال مورد بررسی قرار گرفت [۱۷]. در این مطالعه رفتار غیرخطی سازه همراه با رفتار انواع اتصالات در زلزله‌های حوزه نزدیک و در موقعیت‌های مختلف نسبت به گسل مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه با مقایسه حداکثر پارامترهای زلزله (حداکثر شتاب، سرعت و تغییرمکان زمین)، مشاهده شد خسارت واردہ به ساختمان‌ها بیشترین ارتباط را با اوج تغییرمکان زمین دارد. ملاحظه شد بیشتر شکستهای جوش، در بال تیرها اتفاق می‌افتد. همچنین در بعضی از ساختمان‌ها، با وجود این که پاسخ سازه کم بوده است، بعضی از اتصالات شکسته است. با بررسی پایداری ساختمان‌هایی که دارای درصد بالایی از شکستهای جوشی بودند مشخص شد، عامل پایداری ساختمان‌ها ناشی از اتصالات سالم، مقاومت باقیمانده در اتصالات شکسته شده، اندرکنش دال، مقاومت محوری تیرها، مقاومت اتصالات ساده قاب‌های ثقلی، مقاومت بیشتر فولاد و کرنش سخت شدگی بوده است. همچنین مقاومت ساختمان‌ها به طور چشم‌گیری بیشتر از سطح طرح شده بر اساس آیین‌نامه است که این مساله به دلیل محدود کردن تغییر مکان‌های نسبی و عوامل ذکر شده در فوق می‌باشد. این مطالعه نشان داد که سه پارامتر ارتفاع سازه، سختی جانبی و نوع اتصال در پاسخ سازه بسیار موثر است. با مقایسه رفتار ساختمان ۶ و ۲۰ طبقه مشخص شد که تغییر مکان‌های نسبی در ساختمان‌های ۶ طبقه بیشتر از ساختمان‌های ۲۰ طبقه است، با این که مقاومت جانبی

^{۳۴} Hall

^{۳۵} Olive View

ساختمان‌های ۶ طبقه نسبت به وزن، از ساختمان‌های ۲۰ طبقه بزرگ‌تر است. همچنین با مقایسه دو ساختمان ۶ طبقه که بر اساس آیین‌نامه ژاپن و UBC94 طرح شده بودند، مشخص شد ساختمانی که بر اساس آیین‌نامه ژاپن طرح شده است، دارای مقاومت جانبی بیشتری است. همچنین مشاهده شد افزایش سختی جانبی تأثیر کمی در افزایش مقاومت ساختمان در برابر زلزله حوزه نزدیک دارد که احتمالاً با افزایش سختی، سازه بار جانبی بیشتری جذب می‌کند. بررسی اتصالات دو پارامتر مهم را نشان داد، به طوری که کرنش بالای شکستگی اتصالات و مقاومت باقیمانده بعد از شکست در اتصالات، تأثیر مفیدی در مقاومت سازه دارد. در این تحقیق مشاهده شد ساختمان‌هایی که دارای اتصالات نیمه شکل پذیر بودند آسیب دیدند ولی دچار خسارات عمده‌ای نشدند. اما بعضی از ساختمان‌هایی که دارای اتصالات ترد بودند دچار آسیب‌های چشمگیری شدند. در حالات خاصی مشاهده گردید که افزایش مقاومت باعث افزایش پاسخ می‌شود و بعد از شکست تعدادی از اتصالات، پاسخ سازه کاهش می‌یابد به طوری که این نتایج تحت تأثیر محتوای فرکانسی زلزله، فرکانس اصلی ارتعاش سازه و اثرات غیرخطی هستند.

مالهوتراء^{۳۶} با ایده‌آل سازی ساختمان‌ها با مدل تیر برشی یکنواخت، به بررسی پاسخ ساختمان‌ها در برابر حرکات نزدیک گسل پرداخت [۸]. او نشان داد که زلزله‌هایی با نسبت PGV/PGA زیاد، در طیف پاسخ خود محدوده حساس به شتاب وسیعی دارند که این پدیده برش پایه، جابجایی نسبی و تقاضای شکل‌بذری را در ساختمان‌های بلند مرتبه افزایش خواهد داد.

چوپرا^{۳۷} و چینتان‌پاکدی^{۳۸} در تحقیق خود مقایسه‌ای بین پاسخ الاستیک و غیر الاستیک سیستم‌های یک درجه آزاد تحت رکوردهای نزدیک گسل و دور از گسل انجام دادند [۹]. بدین منظور آن‌ها طیف پاسخ الاستیک و غیر الاستیک را بررسی نمودند و دریافتند که در اکثر زلزله‌های حوزه نزدیک طیف پاسخ الاستیک و طیف پاسخ غیر الاستیک برای مولفه‌های موازی و عمود بر گسل بسیار متفاوت است و مولفه عمود بر گسل نیاز تغییر شکل و نیاز مقاومت بزرگ‌تری را در یک محدوده وسیع پریودی تقاضا می‌کند. آن‌ها طیف پاسخ را در نمودار چهار جانبه بر اساس روش نیومارک رسم کرده و بر این اساس طیف را به سه قسمت تقسیم بندی نمودند. قسمت پریود-بلند (سمت راست

^{۳۶} Malhotra

^{۳۷} Chopra

^{۳۸} Chintanapakdee

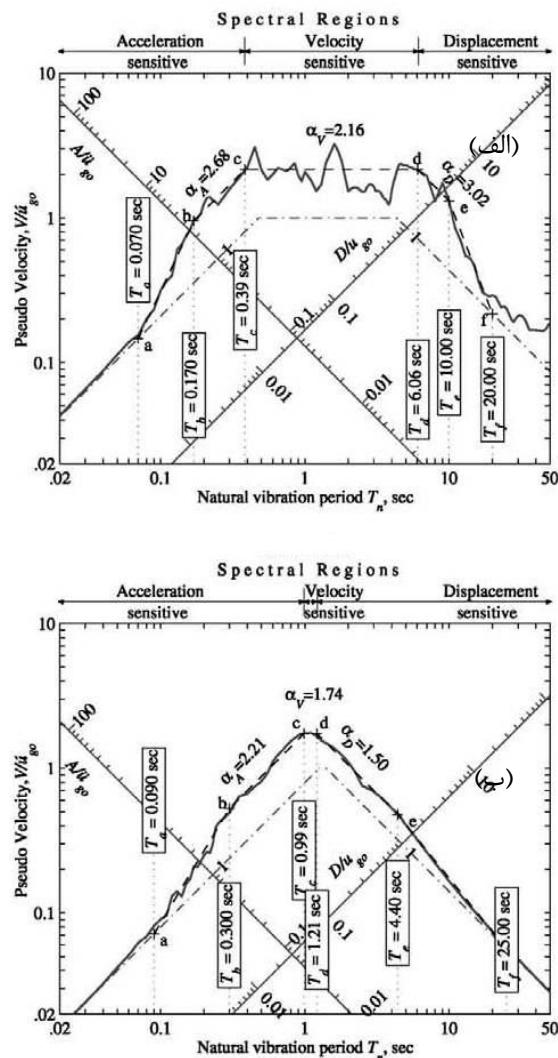
نقطه d در شکل ۱-۱۱)، که در آن $T_n > T_d$ و معرف ناحیه جابجایی-ثابت است. قسمت پریود-کوتاه (سمت چپ نقطه c در شکل ۱-۱۱)، که در آن $T_c < T_n$ و معرف ناحیه شتاب-ثابت است و نهایتاً قسمت پریود-متوسط (بین نقطه c و d در شکل ۱-۱۱)، که در آن $T_d < T_n < T_c$ و معرف ناحیه سرعت-ثابت است. برای حرکات خاص زمین، پریودهای T_a ، T_b ، T_e و T_f در طیف نرمال شده مستقل از میرایی هستند اما T_c و T_d با تغییر میرایی تغییر می‌کند (شکل ۱-۱۱). ناحیه سرعت-ثابت زلزله نزدیک گسل خیلی باریکتر از زلزله دور از گسل و ناحیه شتاب-ثابت و جابجایی-ثابت آن در مقایسه با زلزله دور از گسل عریض‌تر است. دلیل اینکه پریود T_c تحت زلزله‌های حوزه نزدیک در مقایسه با زلزله‌های دور از گسل بزرگ‌تر است، افزایش نسبت \dot{u}_{g0}/u_{g0} تحت زلزله‌های حوزه نزدیک در قیاس با زلزله‌های دور از گسل است. از طرفی پریود T_d زلزله‌های حوزه نزدیک کوچک‌تر از مقدار یاد شده برای زلزله‌های دور از گسل است و این به دلیل نسبت کوچکتر u_{g0}/\dot{u}_{g0} زلزله‌های حوزه نزدیک نسبت به زلزله‌های دور از گسل است. ناحیه باریک سرعت-ثابت که به سمت پریودهای بالاتر انتقال یافته است و نواحی عریض شتاب-ثابت و جابجایی-ثابت، از خصوصیات اکثر زلزله‌های حوزه نزدیک می‌باشند. آنچه از مقادیر شتاب، سرعت و جابجایی حرکات نزدیک گسل مشهود است این است که برای زلزله‌های حوزه نزدیک مقادیر \dot{u}_{g0}/u_{g0} بزرگ‌تر و مقادیر u_{g0}/\dot{u}_{g0} کوچک‌تر از مقادیر مشابه تحت حرکات دور از گسل است.

لیاو^{۳۹} و همکاران پاسخ دینامیکی قاب خمی بتن مسلح را تحت زلزله‌های حوزه نزدیک بررسی کردند [۱۸]. در این تحقیق سه موضوع مورد بررسی قرار گرفت. اولین موضوع مقایسه رفتار دینامیکی یک سازه ساختمانی بتن مسلح تحت زلزله‌های نزدیک گسل و دور از گسل است. نتایج حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی حاکی از آن است که زلزله‌های نزدیک گسل سبب آسیب بیشتری در مقایسه با زلزله‌های دور از گسل می‌شوند. موضوع دوم این تحقیق مقایسه شکل‌پذیری پیش‌بینی شده توسط تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی با نتایجی است که بوسیله تحلیل پوش اور^{۴۰} به دست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که تغییر مکان طیفی به دست آمده بوسیله تحلیل پوش اور در مقایسه با تحلیل دینامیکی با مقادیر PGA مختلف، به طور ناگهانی نوسان کرده است. موضوع سوم

³⁹ Liao

⁴⁰Pushover

پیدا کردن پارامترهایی است که بیشترین تأثیر را بر روی مشخصات پاسخ دینامیکی سازه‌های ساختمانی از قبیل برش پایه و تغییر مکان خواهد گذاشت. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نسبت سرعت طیفی، انرژی ورودی زمین و حداکثر جابجایی نسبی طبقه نیز افزایش می‌یابد.



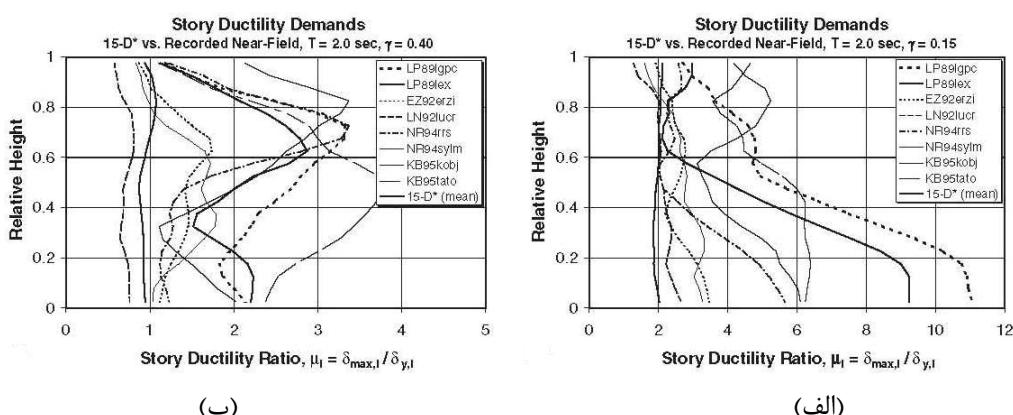
شکل ۱-۱۱- طیف پاسخ سه جانبی مولفه عمود بر گسل حرکات زمین به ازاء میرایی ۰.۵٪؛ (الف) زلزله دور از گسل تفت؛ (ب) زلزله نزدیک گسل نورثریدج [۹].

علوی^{۴۱} و کراوینکلر^{۴۲} به بررسی نیاز شکل‌پذیری سازه‌های نسبتاً قوی و نسبتاً ضعیف در معرض مولفه عمود بر گسل زلزله‌های نزدیک گسل در مسیر شکست پیش‌رونده پرداختند [۱۹]. این محققین برای مقایسه متوسط نیاز شکل‌پذیری طبقه، مجموعه‌ای شامل ۱۵ رکورد نزدیک گسل و

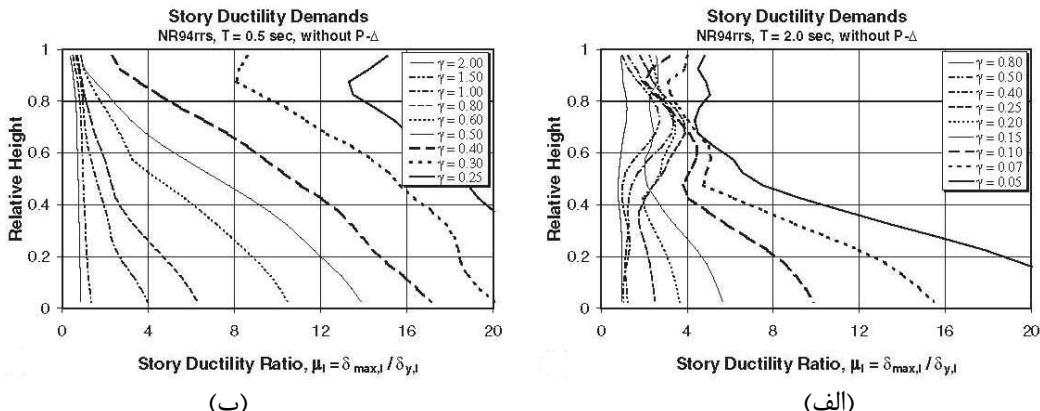
⁴¹ Alavi

⁴² Krawinkler

میانگین ۱۵ رکورد مربوط به زلزله‌های دور از گسل را در نظر گرفتند. آنها برای سیستم چند درجه آزاد با پریود مبنای ۲ ثانیه و ضرایب مقاومتی $\gamma = 0/15$ و $\gamma = 0/4$ (که به ترتیب متناظر با سازه‌های نسبتاً قوی و نسبتاً ضعیف می‌باشند، به محاسبه نیاز شکل‌پذیری طبقه‌ای پرداختند. به عنوان یک نتیجه‌گیری مهم، در اکثر رکوردهای نزدیک گسل، ماکریم می‌باشد شکل‌پذیری طبقه‌ای، چنان‌چه سازه قوی باشد (برای γ بزرگ) در بخش‌های بالای ساختمان اتفاق می‌افتد. چنان‌چه سازه ضعیفتر گردد (برای γ کوچک) نیاز شکل‌پذیری به سمت پایه منتقل خواهد شد (شکل ۱-۱۲). با توجه به مطالعات این محققین توزیع برش برای سیستم‌های با پریود کوتاه ($T < 1$ sec) نسبتاً هموار است و با توزیع طراحی مشابه دارد. در نقطه مقابل، برای پریودهای بلند، به دلیل تأثیر موج عبوری به سمت بالای ساختمان توزیع برش ایجادی به صورت قابل توجهی نسبت به توزیع برش طراحی متفاوت است. (شکل ۱-۱۳).



شکل ۱-۱۲- نیاز شکل‌پذیری طبقه برای زمینلرزه‌های نزدیک گسل مختلف، $T=2$ sec؛ (الف) ضریب مقاومتی $\gamma = 0/15$ (سازه ضعیف)؛ (ب) ضریب مقاومتی $\gamma = 0/4$ (سازه قوی) [۱۹].



شکل ۱-۱۳- وابستگی نیاز شکل‌پذیری طبقه و ضریب مقاومتی (γ) برای زلزله NR94rrs؛ (الف) $[۱۹] T=0.5$ sec؛ (ب) $T=2$ sec

لطفالهی رفتار دینامیکی غیرخطی قاب‌های بلند خمشی فولادی را تحت اثر رکوردهای نزدیک گسل و دور از گسل بررسی و مقایسه نمود [۲۰]. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در سازه‌های با زمان تناوب بالاتر، حداکثر جابجایی نسبی طبقات بالاتر نسبت به طبقات پایین‌تر بیشتر است.

جعفرخانی ویژگی‌های لرزه شناختی محدوده نزدیک گسل را مورد بررسی قرار داد [۲۱]. بررسی‌های صورت گرفته پیرامون ویژگی‌های لرزه شناختی محدوده نزدیک گسل موید لزوم نگرش خاص به مبحث طراحی سازه‌های واقع در این محدوده است. نتایج به دست آمده به اهمیت مولفه قائم شتاب حرکتی زمین در نزدیکی مرکز زلزله و آسیب پذیری سازه‌ها در برابر آن اشاره کرده و لزوم توجه به پدیده تشدید در ارتفاع سازه و بحث خستگی در اعضا تحت تأثیر مولفه قائم شتاب حرکت زمین را مورد تاکید قرار می‌دهد.

عدالت تأثیر میرایی و تسلیم سازه‌ای را تحت اثر طیف رکوردهای زلزله نزدیک گسل مورد بررسی قرار داد [۲۲]. در این تحقیق طیف پاسخ شتاب نگاشتهای نزدیک گسل در نسبت‌های میرایی مختلف و طیف پاسخ غیرخطی آن‌ها از نظر تفاوت در شکل‌پذیری و انرژی تسلیم سیستم سازه‌ای در مقایسه با شتاب نگاشتهای دور از گسل مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که تقاضای تحمیل شده به سازه در نزدیکی گسل به دلیل وجود پالس‌هایی با انرژی زیاد می‌تواند از ظرفیت سازه‌ای که مطابق استانداردهای موجود و بدون در نظر گرفتن تاثیرات نزدیک گسل طراحی شده فراتر برود.

بدرلو رفتار دینامیکی غیرخطی قاب‌های فولادی برون محور (EBF) را تحت تأثیر زلزله‌های حوزه نزدیک بررسی نمود [۲۳]. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که نیاز شکل‌پذیری رکوردهای نزدیک گسل بیش از نیاز شکل‌پذیری رکوردهای دور از گسل است و ضریب تشدید برش پایه برای قاب‌های بررسی شده (قاب‌های ۳، ۶ و ۱۲ طبقه) برابر است. همچنین تغییرات طول پیوند بر میزان برش پایه تأثیر چندانی ندارد و سازه‌های مورد مطالعه تحت زلزله‌های نزدیک گسل محدودیت تغییرمکانی آیین‌نامه‌های موجود را برآورده نمی‌کنند.

در دایی به بررسی پاسخ غیر ارتجاعی ساختمان‌ها تحت تأثیر همزمان مولفه‌های افقی زلزله‌های نزدیک گسل پرداخت [۲۴]. بدین منظور ساختمان‌هایی با ویژگی متفاوت به صورت یک طبقه سه بعدی، ایده‌آل‌سازی گردید و تعدادی از رکوردها با خصوصیات نزدیک گسل انتخاب و پاسخ غیر

ارتجاعی ساختمان‌های مدل شده تحت مولفه‌های افقی رکوردهای نزدیک گسل محاسبه گردید و با پاسخ ساختمان‌های مشابه تحت زلزله‌های دور از گسل مقایسه شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با توجه به مشخصات رکوردهای نزدیک گسل در جهت عمود بر گسل، سیستم‌های سازه‌ای رفتار متفاوتی تحت اثر رکودهای نزدیک گسل از خود نشان می‌دهند.

قادری به بررسی تأثیر زلزله‌های حوزه نزدیک بر رفتار لرزه‌ای سازه‌های با پریود بالا پرداخت [۲۵]. در این زمینه تاثیرات ناشی از تغییرات پریود پالس بررسی شده و ظرفیت واقعی سازه با نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی غیرخطی با الگوهای متداول، مقایسه شده است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که به دلیل پالس موجود در رکورد سرعت زلزله‌های حوزه نزدیک و وابستگی پریود پالس و بزرگای زلزله به یکدیگر، الگوی طیف پاسخ مربوط به این نوع زلزله‌ها برخلاف زلزله‌های حوزه دور نسبت به افزایش بزرگای زلزله روند یکسانی ندارند. همچنین نمودار ظرفیت سازه‌ها با توجه به پریود وقوع زلزله به خصوص در نواحی غیر ارجاعی، رفتار متفاوتی را نشان می‌دهد و اصلاح الگوی توزیع برش پایه در ارتفاع این سازه‌ها با در نظر گرفتن اثر حوزه نزدیک فقط با منظور کردن ضرایبی در طیف طراحی کافی نبوده و نیاز به اصلاح اساسی دارد.

خسروی پاسخ سازه‌ها تحت حرکت پالسی شکل زمین در حرکات نزدیک گسل را بررسی نمود [۲۶]. برای این منظور سازه به صورت یک تیر پیوسته مدل شده که ترکیبی از یک تیر طره بشی و یک تیر طره خمی است. نتایج نشان می‌دهد که ماکزیمم تغییرمکان نسبی در سازه‌ای با رفتار خمی در بالاترین ارتفاع ساختمان اتفاق می‌افتد که بر اساس تحلیل‌های انجام شده، این ارتفاع به نسبت پریود طبیعی ساختمان به پریود پالس (T/T_p) حساس نمی‌باشد. تحلیل دینامیکی سازه‌ها با رفتار بشی نشان می‌دهد که ماکزیمم تغییرمکان نسبی در این سازه‌ها نسبت به (T/T_p) خیلی حساس بوده و با افزایش این پارامتر محل اتفاق افتادن ماکزیمم تغییرمکان نسبی به سمت طبقات فوقانی حرکت می‌کند.

فتوحی اردکانی به بررسی اثر تحریک‌های دو جهتی^{۴۳} در زلزله‌های نزدیک گسل پرداخت [۲۷]. آین‌نامه‌های طراحی تعیین پاسخ‌های لرزه‌ای را در اثر اعمال مولفه‌های زلزله در زاویه‌ای که بیشترین پاسخ را ایجاد کند، الزامی می‌دانند. همچنین به عنوان یک راه حل جایگزین تعیین پاسخ

⁴³ Bidirectional

سازه با استفاده از دو آنالیز مستقل و ترکیب نتایج به کمک روش‌های مختلفی از جمله ۳۰٪، ۴۰٪ و SRSS^{۴۴} پیشنهاد شده است. پس از تحلیل نتایج، مشخص شد که برای پاسخ‌های نیرویی مثل برش پایه، برای هر دو زلزله نزدیک گسل و دور از گسل می‌توان از روش ۴۰٪ برای لحاظ کردن اثرات دوجهتی استفاده کرد اما برای پاسخ‌های جابجایی مثل جابجایی نسبی طبقات، هیچ یک از روابط تقریبی برای زلزله‌های نزدیک گسل مناسب نیست در حالیکه برای زلزله‌های دور از گسل می‌توان از روش ۴۰٪ استفاده کرد.

۱-۵-۵- اثر زلزله‌های حوزه نزدیک بر روی سازه‌های مجهر به سیستم‌های جداسازی پایه و سیستم‌های کنترل لرزه‌ای

نحوه عملکرد سیستم‌های کنترل لرزه‌ای سازه‌ها در مواجهه با زلزله‌های حوزه نزدیک مورد ارزیابی محققین مختلف قرار گرفته است. بدین منظور در این بخش رفتار و عملکرد سازه‌های مجهر به انواع سیستم‌های کنترلی و توانایی هر یک از سیستم‌ها در کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک مورد بررسی قرار می‌گیرد.

یانگ^{۴۵} و آگراوال^{۴۶} به بررسی انواع سیستم‌های کنترل هیبریدی مختلف با عملکرد ایمن برای ساختمان‌های غیرخطی تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک پرداختند [۱۴]. سیستم‌های کنترل هیبریدی معرفی شده شامل سیستم جداسازی پایه به اضافه تجهیزات کنترلی غیرفعال، میراگرهای نیمه‌فعال و ترکیبی از آن‌ها است. سیستم‌های کنترلی بکار رفته در این تحقیق شامل میراگرهای ویسکوز، میراگرهای اصطکاکی و همچنین دو سیستم کنترلی نیمه‌فعال جدید به نام سختی نیمه‌فعال دوباره تنظیم شونده (RSASD)^{۴۷} و میراگر اصطکاکی الکترومغناطیسی نیمه‌فعال (SAEMFD)^{۴۸} است. بدین منظور مطالعات عددی وسیعی برای کنترل ساختمان‌های با جداسازی پایه در معرض زلزله‌های حوزه نزدیک انجام شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که سیستم جداسازی پایه به تنها یی قادر به حفاظت ساختمان در برابر زلزله‌های حوزه نزدیک نمی‌باشد، با این حال با افزودن میراگرهای

⁴⁴ Square Root of Summation of Squares

⁴⁵ Yang

⁴⁶ Agrawal

⁴⁷ Resetting semiactive stiffness damper

⁴⁸ Semiactive electromagnetic friction damper

سیال لزج غیرفعال با ظرفیت میرایی بالا یا میراگرهای ویسکوز غیرفعال با ظرفیت میرایی متوسط و میراگرهای اصطکاکی غیرفعال، عملکرد ساختمان کاملاً رضایت بخش می‌شود. در این مطالعه نشان داده شد که سیستم‌های کنترلی RSASD و SAEMFD که به تازگی پیشنهاد شده‌اند در حفظ ایمنی سازه‌های ساختمانی در مقابل زلزله‌های حوزه نزدیک کاملاً موثر هستند.

تريکا^{۴۹} و همکاران پاسخ قاب‌های فولادی میان مرتبه را با و بدون میراگرهای غیرفعال تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک مورد بررسی قرار دادند [۲۸]. آن‌ها دریافتند که پاسخ لرزه‌ای قاب‌های فولادی میان مرتبه تحت تأثیر زلزله‌های حوزه نزدیک، تقاضای شکل‌پذیری بالاتری در مقایسه با زلزله‌های حوزه متوسط و دور ایجاد می‌نماید. وقتی سازه نسبتاً سخت‌تر می‌شود، توزیع نیروی برشی در ارتفاع سازه در طبقات بالاتر بیشتر می‌شود. این رفتار سبب می‌شود که تسليیم‌شدگی در طبقات بالاتر زودتر توسعه یابد. وقتی که سختی سازه کاهش می‌یابد، تقاضای شکل‌پذیری حداکثر از طبقات بالا به پایین منتقل می‌شود، از این رو نتایج به دست آمده حساسیت پاسخ سازه‌ای را به نسبت T_S/T_P (و T_P به ترتیب پریود سازه و پریود پالس می‌باشند) و همچنین مقاومت سازه نشان می‌دهد. همچنین تحلیل‌هایی بر روی قاب‌های مجهز به تجهیزات لینک برشی (SL)^{۵۰} انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که قاب فاقد اتلاف کننده انرژی، قسمت عمدۀ انرژی ورودی را خودش جذب می‌نماید و در معرض تغییر‌مکان‌های بزرگ‌تر و جابجایی نسبی بیشتری قرار می‌گیرد. بر عکس، یک قاب مجهز به لینک برشی در محدوده الاستیک باقیمانده و تغییر شکل‌های پلاستیک در اتلاف کننده‌ها متتمرکز می‌شود که می‌توان بعد از زلزله به راحتی آن‌ها را تعویض نمود.

شو^{۵۱} و همکاران عملکرد سیستم‌های اتلاف انرژی غیرفعال (PEDS)^{۵۲} را هنگام وقوع حرکات پالسی شکل زمین در حوزه نزدیک بررسی کردند [۲۹]. بدین منظور طیف جابجایی و شتاب پالس برای سازه‌های با و بدون میراگرهای ویسکوز خطی و غیرخطی و میراگرهای جاری شونده توسعه داده شد. دیدگاه تراز انرژی برای تشریح این موضوع که چرا PEDS با توجه به پریود سازه و پریود پالس عملکرد متفاوتی دارند، مورد استفاده قرار گرفت. با بررسی طیف پاسخ مشاهده شد که عملکرد PEDS در خلال تحریکات پالسی شکل و سینوسی کاملاً متفاوت است. اگر چه عملکرد آن‌ها در نزدیک حالت

⁴⁹ Tirca

⁵⁰ Shear Link

⁵¹ Xu

⁵² Passive energy dissipation system

تشدید برای هر دو نوع تحریک بسیار کارآمد است. هر دو میراگرهای خطی و غیرخطی با نسبت میرایی ۲۵٪ وقتی که $T_p < T_n / 3 / 5$ و T_p به ترتیب پریود سازه و پریود پالس می‌باشند) باعث کاهش ۴۰٪ در تغییرمکان‌ها می‌شوند. میراگرهای ویسکوز غیرخطی وقتی که $T_p > 4 / 5 T_n$ کاهش دهنده اما برای $T_p < 4 / 5 T_n$ ممکن است کاهش تغییرمکان کمتر باشد. میراگرهای جاری شونده وقتی که $1 < T_n / T_p$ باشد می‌توانند همزمان باعث کاهش شتاب، تغییرمکان و انرژی ورودی به سازه می‌شوند. به سازه شوند اما برای $T_n / T_p > 1$ باعث افزایش شتاب، تغییرمکان و انرژی ورودی به سازه می‌شوند. تحلیل تراز انرژی نشان داد که مقادیر پاسخ سازه‌ای فقط وقتی می‌تواند به طور موثری کاهش یابد که انرژی اتلاف شده لحظه‌ای میراگر با انرژی ورودی لحظه‌ای در تمام مدت هم فاز شود.

پُرویداکیس^{۵۳} اثر تجهیزات مختلف جداسازی پایه شامل نشیمن‌های سربی-لاستیکی^{۵۴} (LRB) و میراگرهای ویسکوز الحاقی را به منظور ارزیابی عملکرد لرزه‌ای در پایه ساختمان و سازه فوقانی تحت زلزله‌های نزدیک گسل و دور از گسل، بررسی نمود [۳۰]. با توجه به این نکته که زلزله در محدوده نزدیک گسل باعث ایجاد تحریکات شدید زمین به همراه اثر نامطلوب در سیستم جداسازی پایه و همچنین در پاسخ سازه فوقانی می‌شود، به منظور کاهش این اثر، یک میراگر ویسکوز به سیستم‌های جداسازی شده موجود اضافه شد و استراتژی طراحی موثری تحت تحریکات نزدیک گسل ارایه شد. در صورتیکه در تغییرمکان‌های بزرگ حاصل از زلزله‌های نزدیک گسل یک سطح بالای میرایی مورد نیاز باشد، این سطح از میرایی برای تغییرمکان‌های کوچک بسیار زیاد است بنابراین اگر ساختمان یک زلزله متوسط را تجربه کند سیستم جداسازی پایه دیگر موثر نخواهد بود. بنابراین میراگرهای سیستم جداساز که تغییرمکان را کنترل می‌نمایند باعث سخت شدن بیش از حد ساختمان تحت زلزله دور از گسل می‌شوند و با راندن انرژی به مودهای بالاتر ممکن است دلیل اصلی استفاده از سیستم جداسازی را که کاهش تغییرمکان سازه فوقانی است را زیر سوال ببرد. به خصوص فراهم نمودن میرایی ویسکوز الحاقی برای نشیمن‌های سربی-لاستیکی در ساختمان‌هایی که در معرض زلزله‌های دور از گسل قرار می‌گیرند باعث افزایش تغییرمکان نسبی سازه فوقانی می‌شود.

^{۵۳} Providakis

^{۵۴} Lead-rubber bearing

به منظور ارزیابی اثر زلزله‌های نزدیک گسل بر روی ساختمان‌های جداسازی شده پایه که شامل نشیمن‌های سربی-لاستیکی (LRB)^{۵۵} و نشیمن‌هایی با سیستم اصطکاکی-پاندولی (FPS)^{۵۶} به اضافه میراگرهای ویسکوز است، پروپرداکیس یک سری شبیه‌سازی عددی بر روی این ساختمان‌ها انجام داد [۳۱]. میراگرهای با صورت موازی با ایزولاتورها نصب شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از میرایی الحاقی در محدود نمودن شتاب مطلق طبقات برای هر دو ایزولاتور LRB و FPS تحت زلزله‌های نزدیک گسل موثر است اما شتاب مطلق طبقات برای ساختمان‌های جداسازی شده توسط ایزولاتور LRB و FPS مورد مطالعه، تحت زلزله‌های دور از گسل افزایش می‌یابد.

اقمشه ائی عملکرد لرزه‌ای سازه‌های جداسده را تحت زلزله‌های نزدیک گسل و دور از گسل مورد ارزیابی قرار داد [۳۲]. نتایج کاهش قابل توجه در جابجایی‌های نسبی طبقات سازه را هم برای زلزله‌های حوزه دور و هم زلزله‌های حوزه نزدیک نشان می‌دهد و با توجه به نمودارهای ارائه شده طبقات روسازه ساختمان تقریباً به صورت جسم صلب رفتار می‌کنند. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سختی ثانویه جداساز، جابجایی نسبی طبقات برای سازه‌های در معرض زلزله‌های نزدیک گسل افزایش می‌یابد ولی هنگامی که سازه تحت اثر زلزله‌های دور از گسل قرار می‌گیرد تغییر محسوسی در میزان جابجایی نسبی طبقات ایجاد نمی‌شود.

^{۵۵} Lead-rubber bearing

^{۵۶} Friction-pendulum system

فصل دوم

تاریخچه تحقیقات مرتبط با
میراگرهای باز تنظیم شونده

۱-۲- مقدمه

در فصل قبل مشاهده گردید که زلزله‌های حوزه نزدیک می‌توانند تاثیرات مخربی بر روی سازه‌ها داشته باشند. این امر به دلیل ویژگی‌های خاص زلزله‌های حوزه نزدیک است، به طوری که سیستم‌های متدالو ساختمانی توان مقابله با این نوع زلزله‌ها را ندارند. این امر لزوم استفاده از سیستم‌های کنترلی برای مواجه با زلزله‌های حوزه نزدیک و کاهش خسارت‌های ناشی از آن را آشکار می‌سازد. در این میان، سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال به عنوان یک روش کنترلی توسعه یافته ضمن غلبه بر معایب موجود در سایر سیستم‌های کنترلی، از مزایای آن‌ها برخوردار می‌باشد که این امر باعث استفاده گسترده‌تر از این سیستم‌ها به عنوان یک سیستم جایگزین در کنترل سازه‌ها شده است. در این فصل به بررسی سیستم‌های نیمه‌فعال و مشخصات هر یک از تجهیزات نیمه‌فعال پرداخته می‌شود. در ادامه پارامترهای تجهیزات کنترلی نیمه‌فعال مناسب برای مقابله با زلزله‌های حوزه نزدیک بررسی شده و تحقیقات مرتبط با آن ارائه می‌شود و در پایان مشکلات و کمبودهای تکنیکی مرتبط با این تجهیزات مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۲- سیستم‌های کنترل نیمه فعال

استراتژی کنترل سازه‌ها با استفاده از سیستم‌های نیمه‌فعال مبتنی بر استفاده بهینه از ویژگی‌های مثبت هر دو سیستم کنترل فعال و غیرفعال است. این استراتژی تلاش می‌نماید تا بر کاستی‌های موجود در هر یک از این سیستم‌ها غلبه نموده و یک سیستم کنترلی مناسب، پایدار و قابل اعتماد برای محافظت سیستم‌های سازه‌ای در برابر بارهای دینامیکی ارائه نماید. به طور کلی سیستم‌های نیمه‌فعال دارای دو مزیت عمده نسبت به سیستم‌های کنترل فعال و غیرفعال می‌باشند، نخست آن که برخلاف سیستم‌های فعال، این سیستم‌ها نیاز به منبع انرژی بزرگ برای کنترل ندارند و ثانیاً برخلاف سیستم‌های غیرفعال توانایی کنترل سیستم در یک محدوده وسیع فرکانسی را دارا می‌باشند.

طبق تعاریف موجود، سیستم کنترل نیمه‌فعال به سیستمی اطلاق می‌شود که انرژی مکانیکی به سیستم سازه‌ای تزریق نکند و در عین حال پارامترهای قابل کنترلی دارد که می‌تواند به منظور کنترل بهینه سازه‌ها مورد استفاده قرار گیرد [۳۳]. بنابراین، برخلاف سیستم‌های کنترل فعال، سیستم‌های نیمه‌فعال قادر پتانسیل ناپایدارسازی سازه می‌باشند. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهند

که سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال به طور بسیار موثرتری نسبت به سیستم‌های غیرفعال عمل می‌کنند، ضمن آن که توانایی دستیابی به حداقل سطح عملکرد یک سیستم کاملاً فعال را دارا می‌باشد [۱۲].

به طور کلی سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال را می‌توان در شش گروه دسته بندی نمود:

۱- تجهیزات کنترل سختی نیمه فعال^{۵۷}

۲- تجهیزات کنترل اصطکاک نیمه فعال^{۵۸}

۳- میراگرهای سیال لزج با روزنه متغیر نیمه فعال^{۵۹}

۴- میراگرهای جرمی/اماکنی تنظیم شده نیمه‌فعال^{۶۰} (STMD/STLD)

۵- میراگرهای MR/ER^{۶۱}

۶- میراگرهای MRE^{۶۲}

۱-۲-۲- تجهیزات کنترل سختی نیمه فعال

تجهیزات کنترل سختی نیمه‌فعال برای تغییر دادن سختی و در نتیجه مشخصات ارتعاشی طبیعی سازه‌ای که در آن نصب شده‌اند به کار می‌روند. این تجهیزات اصولاً سختی یک ساختمان را به گونه‌ای کنترل و تنظیم می‌کنند که همواره یک حالت غیر تشدید^{۶۳} در هنگام وقوع زلزله در سازه برقرار باشد.

تجهیزات کنترل سختی که معمولاً توسط بادبند به سازه متصل می‌شوند به گونه‌ای کنترل می‌شوند که می‌توانند به صورت درگیر با سیستم سازه‌ای و یا غیر درگیر با سیستم سازه‌ای رفتار کنند. این امر به ترتیب می‌تواند باعث مشارکت سختی بادبند و یا عدم مشارکت سختی بادبند در سختی کل سازه شود. تجهیزات کنترل سختی شامل یک سیلندر هیدرولیکی، یک شفت دو طرفه و پیستون متصل به آن می‌باشند. مخازن دو طرف سیلندر با استفاده از یک لوله کنار گذر که یک شیر کنترلی سولنوئیدی روی آن نصب شده است به یکدیگر متصل می‌باشند. این شیر کنار گذر در حالت نرمال بسته است. شیر کنترلی می‌تواند روشن و یا خاموش باشد که به ترتیب می‌تواند باعث باز شدن و یا بسته شدن

^{۵۷} Semiactive stiffness control devices

^{۵۸} Semiactive friction control devices

^{۵۹} Semiactive fluid viscose dampers with variable orifice

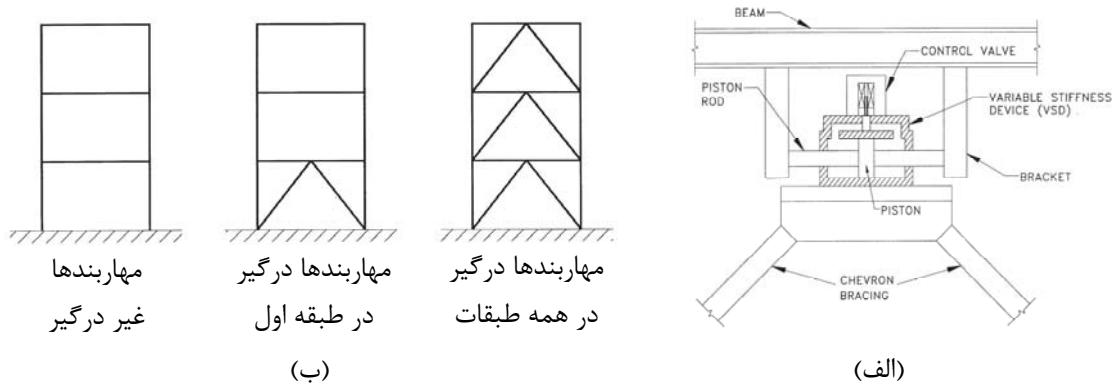
^{۶۰} Semiactive tuned mass/liquid dampers

^{۶۱} Magneto rheological/Electrorheological dampers

^{۶۲} Magneto rheological elastomer dampers

^{۶۳} Non-resonant

جريان عبوری از لوله کنار گذر شود. هنگامی که شیر کنترلی بسته است، سیال نمی‌تواند از لوله کنار گذر عبور کند و باعث قفل شدن تیر به بادبند قوار گرفته در زیر خود می‌شود و در واقع باعث درگیر شدن بادبند می‌شود. بر عکس، هنگامی که شیر کنترلی باز است سیال به صورت آزادانه از لوله کنار گذز عبور می‌کند و باعث از گیر در آوردن بادبند می‌شود. در شکل ۲-۱ شماتیک تجهیزات کنترل سختی نیمه‌فعال متصل به یک مهاربند سورون و حالت‌های مختلف مشارکت مهاربند در سختی کل سازه نشان داده شده است.



شکل ۲-۱- تجهیزات کنترل سختی آزمایش شده توسط کوبوری^{۶۴} و همکاران؛ (الف) جزئیات نصب؛ (ب) حالت‌های مختلف قرارگیری تجهیزات کنترل سختی در سازه آزمایش شده [۳۴].

انرژی مصرف شده توسط هر یک از تجهیزات کنترل سختی در حدود ۲۰ وات است. این تجهیزات را می‌توان در زمرة سیستم‌های با خرابی امن^{۶۵} به حساب آورد چرا که در صورت بروز مشکل در منبع انرژی، با توجه به بسته بودن شیر کنترلی در حالت نرمال، تجهیزات کنترل سختی نیمه‌فعال به طور اتوماتیک باعث درگیر شدن بادبند و در نتیجه افزایش سختی سازه می‌شوند.

۲-۲-۲- تجهیزات کنترل اصطکاک نیمه فعال

تجهیزات کنترل اصطکاک نیمه‌فعال می‌توانند به عنوان اتلاف کننده انرژی در داخل مهاربندی جانبی سازه و یا به عنوان عضوی از یک سیستم جداسازی لغوشی به کار روند. فرض می‌شود که میراگر

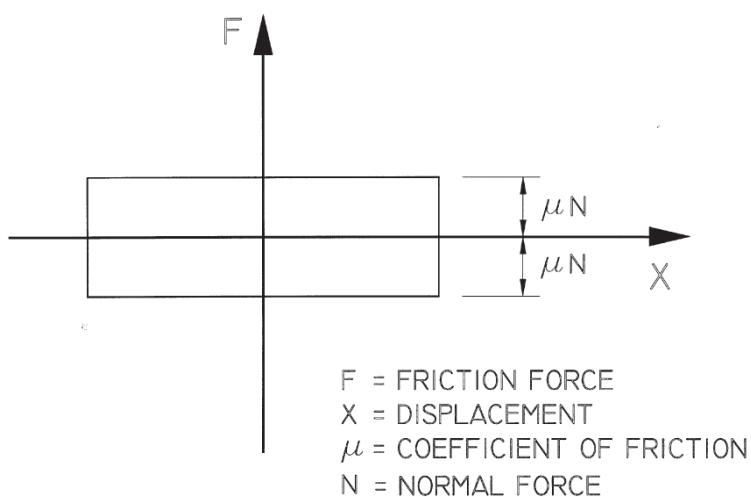
⁶⁴ Kobori

⁶⁵ Fail-safe

اصطکاکی ایدهآل به صورت یک المان کولمب^{۶۶} رفتار می‌کند که در آن صورت نیروی مقاوم آن برابر است با:

$$F = \mu N \operatorname{sgn}(\dot{x}) \quad (1-2)$$

که در آن μ ضریب اصطکاک، N نیروی عمود بر سطح اصطکاک (نیروی نرمال) و \dot{x} سرعت حرکت است. شکل ۲-۲ منحنی هیسترزیس میراگر اصطکاکی ایدهآل که تحت حرکت‌هارمونیک قرار گرفته را نشان می‌دهد. با افزایش نیروی نرمال میراگر، نیروی مقاوم میراگر افزایش یافته و منحنی نیرو تغییرمکان نشان داده شده در شکل ۲-۲ در جهت محور قائم بسط پیدا می‌کند. در نتیجه، سطح زیر نمودار افزایش می‌یابد که نشان دهنده افزایش میزان انرژی تلف شده است. بنابراین میزان اتلاف انرژی در هر سیکل حرکت هارمونیک را می‌توان با تنظیم نمودن میزان نیروی نرمال میراگر اصطکاکی نیمه‌فعال کنترل نمود. در مراجع [۳۷-۳۵] مشخصات تعدادی از میراگرهای کنترل اصطکاک نیمه‌فعال که توسط محققین پیشنهاد و آزمایش شده‌اند، ارائه گردیده است.



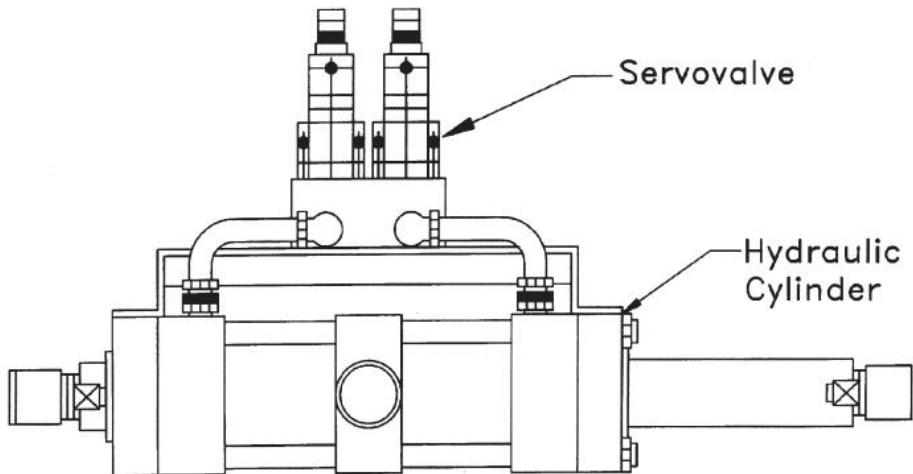
شکل ۲-۲-منحنی هیسترزیس میراگر اصطکاکی کولمب ایدهآل.

۲-۳-۲-۲- میراگرهای سیال لزج با روزنہ متغیر نیمه فعال

یکی از روش‌های دستیابی به تجهیزات میرایی نیمه‌فعال استفاده از یک شیر روزنہ متغیر الکترومکانیکی قابل کنترل است. میراگرهای نیمه‌فعال سیال لزج با روزنہ متغیر معمولاً شامل یک

^{۶۶}Coulomb

سیلندر هیدرولیکی می‌باشد که در آن یک پیستون دو طرف سیلندر را از یکدیگر جدا می‌کند. هنگامی که پیستون به حرکت در می‌آید، سیال داخل میراگر (که معمولاً روغن است) با فشار و سرعت بالا به طرف یک روزنه کوچک رانده می‌شود. اختلاف فشار دو طرف پیستون و در نتیجه نیروی خروجی میراگر با استفاده از یک شیر کنترل خارجی که دو طرف سیلندر را به یکدیگر متصل کرده است تنظیم می‌شود. شیر کنترلی ممکن است به صورت یک شیر سولنوئیدی^{۶۷} برای کنترل میراگر به صورت روشن-خاموش^{۶۸} باشد و یا یک شیر فرمان یار^{۶۹} برای کنترل متغیر باشد. شماتیک یک نمونه از میراگر سیال لزج با روزنه متغیر در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. معمولاً انرژی مورد نیاز برای کنترل شیر میراگر در حدود ۵۰ وات است. زمان عملکرد شیر کنترلی بسته به نوع شیر متفاوت بوده و در حدود ۱۰ تا ۳۰ میلی ثانیه گزارش شده است [۱۲].



شکل ۲-۳- شماتیک میراگر سیال لزج با روزنه متغیر آزمایش شده توسط [۳۸].

۴-۲-۲- میراگرهای جرمی/ماiene تنظیم شده نیمه‌فعال (STMD/STLD)

میراگرهای جرمی تنظیم شده در اصل شامل یک سیستم میراگر-فر-جرم^{۷۰} یک درجه آزاد هستند که معمولاً در بالاترین نقطه یک سازه چند طبقه نصب می‌شوند. مشخصات دینامیکی این میراگر به گونه‌ای تنظیم می‌شود که بتواند حرکات سازه‌ای که این سیستم در آن نصب شده است را کنترل

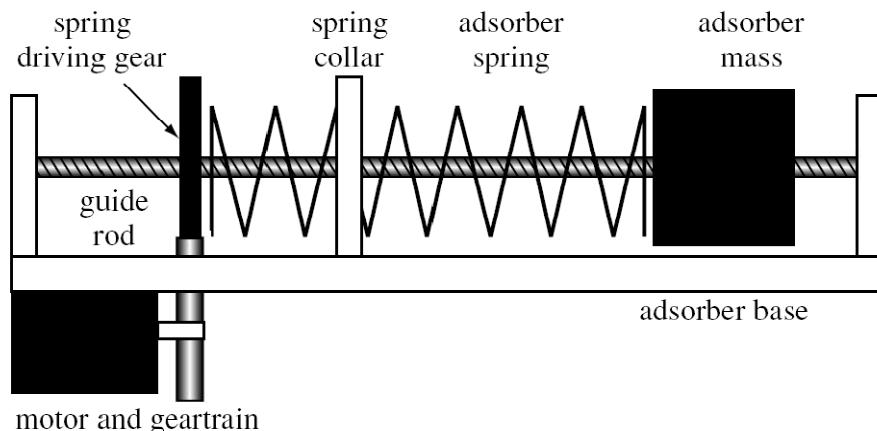
^{۶۷} Solenoid valve

^{۶۸} On-off

^{۶۹} Servo valve

^{۷۰} Mass-spring-damper

نماید. رفتار میراگرهای جرمی تنظیم شده نیمهفعال (STMD) با استفاده از تنظیم مشخصات فنر یا میراگر متصل به سیستم یک درجه آزادی کنترل میشود. در شکل ۲-۴ شماتیک یک نمونه از STMD نشان داده شده است که در آن مشخصات دینامیکی میراگر با استفاده از یک فنر قابل تنظیم، کنترل میشود.



شکل ۲-۴- میراگر جرمی تنظیم شده نیمهفعال با فنر قابل تنظیم [۳۹].

میراگرهای مایعی تنظیم شده نیمهفعال (STLD) مشابه STMD ها میباشند، با این تفاوت که سیستم میراگر-فنر-جرم با یک مخزن پر شده با سیال جایگزین شده است. رفتار میراگرهای مایعی تنظیم شده با تغییر طول یک مخزن هیدرولیک و در نتیجه تغییر فرکانس طبیعی سیال قرار گرفته در آن کنترل میشود. تغییر طول مخزن با جابجایی یک تیغه متحرک که درون مخزن قرار گرفته است انجام میشود. همچنین اخیرا نوع جدیدی از STLD ها پیشنهاد و مطالعه شده است که در آن به جای استفاده از مخازن متدائل مکعبی یا استوانهای شکل، از یک مخزن مخروطی استفاده شده است که با تغییر ارتفاع سیال میتوان فرکانس طبیعی سیال را مطابق نیاز کنترلی تنظیم نمود [۴۰].

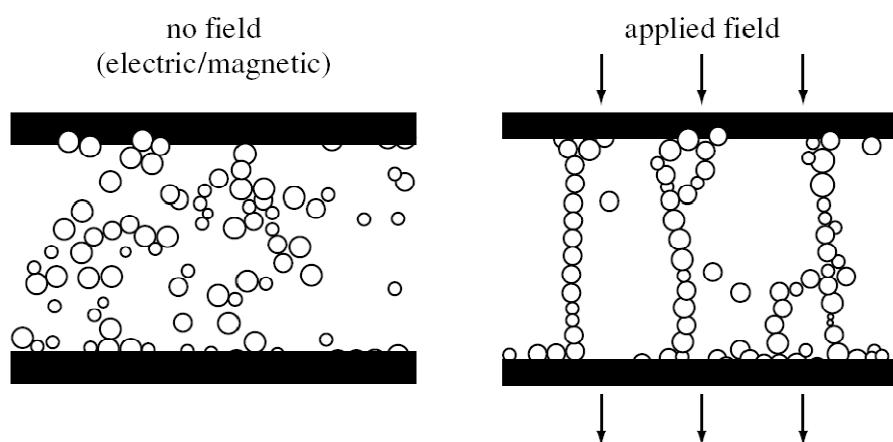
MR/ER-۵-۲- میراگرهای

میراگرهای ER معمولاً شامل یک سیلندر هیدرولیکی میباشند و حاوی ذرات دی الکتریک^{۷۱} با سایز میکرونی هستند که در یک سیال (معمولأ روغن) به صورت معلق پخش شده‌اند. در حضور یک میدان

^{۷۱} Dielectric

الکتریکی قوی، ذرات دی الکتریک قطبی شده^{۷۲} و یک ساختار زنجیره‌ای مطابق با شکل میدان الکتریکی را به خود می‌گیرند که این ساختار زنجیره‌ای شکل باعث افزایش مقاومت در برابر جریان سیال می‌شود. در شکل ۲-۵ نحوه شکل گیری ساختار زنجیره‌ای شکل ذرات ناشی از اعمال میدان خارجی نشان داده شده است. با تغییر شدت میدان الکتریکی، رفتار دینامیکی میراگر ER را می‌توان تنظیم نمود. هنگامی که میدان الکتریکی افزایش می‌یابد، ERF^{۷۳} این قابلیت را دارد که از یک سیال ویسکوز به یک ماده نیمه جامد جاری شونده تغییر حالت دهد. این تغییر حالت ماده تقریباً آنی بوده و در چند میلی ثانیه اتفاق می‌افتد و کاملاً برگشت‌پذیر است، یعنی با حذف میدان الکتریکی، ماده دوباره به حالت اولیه خود (حالت بدون اعمال میدان الکتریکی) بر می‌گردد.

میراگرهای MR در واقع نوع مغناطیسی از میراگرهای ER هستند. از لحاظ کیفی، رفتار دو نوع میراگر بسیار شبیه به هم است با این تفاوت که در میراگرهای MR به جای استفاده از ذرات دی-الکتریک، از ذرات مغناطیسی با سایز میکرونی استفاده می‌شود و به جای اعمال میدان الکتریکی، از میدان مغناطیسی برای تغییر رفتار دینامیکی میراگر MR استفاده می‌شود. MRF^{۷۴} یک مزیت بسیار عمده نسبت به ماده ER دارد که آن میزان بالای حداقل تنش جاری شدن ماده MR است که چیزی در حدود ۲۰ تا ۵۰ برابر بیشتر از ماده ER است [۳۹].



شکل ۲-۵- ساختار زنجیره‌ای شکل ذرات معلق در ماده MR/ER تحت میدان الکتریکی/مغناطیسی خارجی [۳۹].

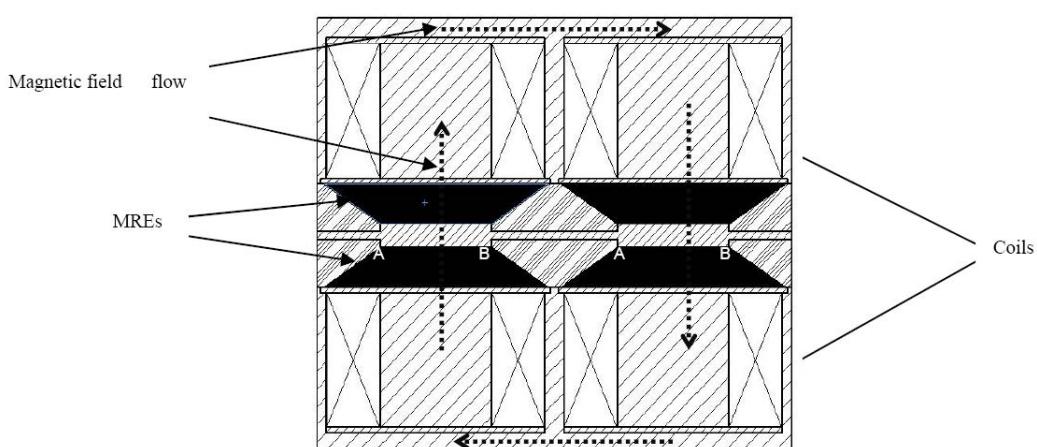
⁷² Polarize

⁷³ Electrorheological fluid

⁷⁴ Magneto rheological fluid

۶-۲-۶- میراگرهای MRE

MRE در واقع یکی از هم خانواده‌های مواد هوشمند موسوم به MR است. MRE یک نوع ماده ویسکو الاستیک است که سختی و میرایی آن با میدان مغناطیسی تغییر می‌کند. MRE در واقع فاز جامد MRF است که در آن سیال با یک ماده ویسکوالاستیک جایگزین شده است. در MRE‌ها ذرات مغناطیسی با سایز میکرونی درون یک ماتریس پلیمری الستیک پخش می‌شوند که این ماتریس پلیمری پس از طی فرآیند عمل آوری به یک ماده جامد تبدیل شده و ذرات مغناطیسی را در محل خود ثابت نگه می‌دارد. این امر از رسوب ذرات مغناطیسی که یک پدیده رایج در MRF‌ها است و همواره به عنوان یکی از معایب میراگرهای MR از آن یاد می‌شود، جلوگیری می‌نماید. عملکرد MRE بر پایه اندرکنش مغناطیسی بین ذرات است. وقتی که میدان مغناطیسی خارجی به MRE اعمال می‌شود، ذرات مغناطیسی سعی در هم راستا نمودن خود در امتداد میدان مغناطیسی اعمال شده دارند. این عمل باعث افزایش مدول برشی MRE می‌شود که متناسب با شدت میدان مغناطیسی اعمال شده، قابل تنظیم است. خصوصیات منحصر بفرد MRE و مزایای آن نسبت به MRF‌ها باعث جلب توجه ویژه محققین به این ماده هوشمند و کنترل پذیر شده است. با توجه به این که مدت زمان زیادی از ابداع MRE نمی‌گذرد، در سال‌های اخیر تعدادی تجهیزات و میراگرهای نیمه‌فعال با استفاده از MRE‌ها پیشنهاد شده و خصوصیات آن مورد مطالعه قرار گرفته است [۴۱-۴۳]. در شکل ۲-۶ از MRE‌ها نمونه از این میراگرهای نشان داده شده است.



شکل ۲-۶- شماتیک مقطع عرضی نشیمن نیمه‌فعال ساخته شده از MRE [۴۱].

برخلاف MRF که تنش برشی جاری شدن آن متناسب با میدان مغناطیسی تغییر می‌کند، در مدول برشی^{۷۵} و ضریب اتلاف^{۷۶} ماده وابسته به میدان مغناطیسی بوده و با آن تغییر می‌کند. این تغییر در خواص دینامیکی ماده بسیار سریع بوده (در حد چند میلی ثانیه) و کاملاً برگشت‌پذیر است.

۳-۲- پارامترهای سیستم کنترلی نیمه‌فعال مناسب برای مقابله با زلزله‌های حوزه نزدیک

در فصل اول مشاهده گردید که یکی از خصوصیات بارز زلزله‌های حوزه نزدیک وجود یک اثر پالس‌گونه با پریود بلند در ابتدای رکوردهای زلزله‌های حوزه نزدیک و اعمال نیروی ضربه‌گونه به سازه‌ها است. علاوه بر این مقادیر بسیار بالای PGV یکی دیگر از مواردی است که باید به آن توجه داشت.

اکثر تجهیزات نیمه‌فعالی که در بخش قبل مورد مطالعه قرار گرفتند به گونه‌ای عمل می‌نمایند که باعث تغییر میرایی سیستم می‌شوند و در نتیجه نیروی خروجی آن‌ها متناسب با سرعت تحریک اعمال شده به سیستم است. در صورت استفاده از این تجهیزات برای کنترل سازه در مقابل زلزله‌های حوزه نزدیک و با توجه به بزرگ بودن مولفه سرعت در این نوع زلزله‌ها، در صورتیکه میراگر نتواند انرژی ورودی به سیستم سازه‌ای را به موقع تلف نماید، باعث انتقال نیروهای بزرگی به سازه شده و عملکرد سیستم کنترلی را با مشکل مواجه می‌سازد.

میراگرهای باز تنظیم شونده^{۷۷} جزء تجهیزات کنترل سختی می‌باشند که در مقایسه با اکثر تجهیزات نیمه‌فعال که میرایی سیستم را تغییر می‌دهند، باعث تغییر سختی سیستم می‌شوند. نیروی خروجی این میراگرها متناسب با تغییر مکان نسبی دو انتهای میراگر بوده و مستقل از سرعت تحریک است. این میراگرها معمولاً شامل یک سیستم سیلندر-پیستون به اضافه یک شیر کنارگذر^{۷۸} می‌باشند که دو طرف سیلندر را به یکدیگر متصل می‌نماید [۴۴]. در هنگام بسته بودن شیر کنارگذر، میراگرهای باز تنظیم شونده مانند یک فنر بادی یا هیدرولیکی (بسته به نوع سیال موجود در سیلندر)

⁷⁵ Shear modulus

⁷⁶ Loss factor

⁷⁷ Resettable dampers

⁷⁸ Bypass valve

عمل کرده و در مقابل تغییرمکان پیستون در هر دو جهت مقاومت می‌نمایند. سختی این میراگرها بستگی به طول سیال فشرده شونده در جهت اعمال تغییرمکان دارد و این امکان وجود دارد که با باز تنظیم شدن میراگر (با باز کردن شیر کنار گذر) در موقع مقتضی، انرژی اعمال شده به سازه که به صورت انرژی پتانسیل در سیال ذخیره شده است با عبور از مسیر کنار گذر به صورت حرارت تلف شود [۴۵]. علاوه بر این با توجه به این که در میراگرهای باز تنظیم شونده این امکان وجود دارد که طول فشرده نشده سیال در هر لحظه مجدداً تنظیم شود، لذا امکان شکل‌دهی منحنی هیسترزیس میراگر متناسب با نیاز کنترلی وجود دارد. وجود این پارامتر باعث افزایش انعطاف پذیری میراگرهای باز تنظیم شونده برای کنترل بهینه پاسخ لرزه‌ای سازه می‌شود.

با توجه به مشخصات میراگرهای باز تنظیم شونده، به نظر می‌رسد که این تجهیزات گزینه مناسبی برای کنترل سازه‌ها در مقابل زلزله‌های حوزه نزدیک باشند. به علاوه، این میراگرها این توانایی را دارند که در برابر زلزله‌های حوزه دور نیز به طور موثری عمل نمایند و در نهایت به عنوان یک سیستم کنترلی پایدار و قابل اعتماد مورد استفاده قرار گیرند. بدین منظور در ادامه این فصل به بررسی تاریخچه تحقیقات انجام شده مرتبط با میراگرهای باز تنظیم شونده پرداخته می‌شود.

۴-۲- تحقیقات انجام شده مرتبط با میراگرهای نیمه‌فعال باز تنظیم شونده^{۷۹}

اولین تحقیقات انجام شده پیرامون میراگرهای باز تنظیم شونده در سازه‌ها به سال ۱۹۹۵ بر می‌گردد که توسط بابرو^{۸۰} و همکاران انجام شد [۴۵]. در این تحقیق بابرو و همکاران یک میراگر باز تنظیم شونده هیدرولیکی را پیشنهاد دادند. یک نمونه اولیه از میراگر پیشنهادی که در آن از هوا به عنوان سیال فشرده شونده استفاده شده بود بر روی یک مدل آزمایشگاهی سه طبقه تست شد. علاوه بر این، تکنیک‌های مختلف کنترلی برای میراگر پیشنهادی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج عددی و آزمایشگاهی به دست آمده حاکی از موثر بودن میراگر پیشنهادی و روش‌های کنترلی به کار رفته در آن است.

^{۷۹} Semi-active resttable dampers

^{۸۰} Bobrow

بابرو و جباری^{۸۱} یک محرک^{۸۲} نیمهفعال جدید را توسعه داده و روش‌های کنترلی مرتبط با آن را بررسی نمودند [۴۶]. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با استفاده از دیدگاه کنترل نیمهفعال غیرخطی پیشنهادی می‌توان به عملکرد بالاتری با قابلیت اعتماد بیشتر برای کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه دست یافت. علاوه بر این در صورت وجود بار ضربه‌ای عملکرد سیستم کنترلی پیشنهادی بسیار مناسب‌تر از میراگرهای ویسکوز متداول است. زیرا نیروی انتقال یافته به میراگر پیشنهادی وابسته به تغییرمکان اعمال شده بوده و مستقل از سرعت بارگذاری است.

تای^{۸۳} و همکاران دو نگرش کنترلی را برای سازه‌های مجهز به تجهیزات کنترل سختی نیمهفعال گسترش داده و فرمول بندی نمودند [۴۷]. در این تحقیق ویژگی‌های هر یک از کنترل‌ها بررسی گردید و همچنین راهکارهای طراحی برای جانمایی بهینه تجهیزات نیمهفعال در سازه مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

بابرو و همکاران مشخصات نیرو-تغییرمکان و همچنین توانایی باز تنظیم شدن یک محرک بادی^{۸۴} نیمهفعال را به طور آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند [۴۸]. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با استفاده از تکنیک کنترل سازه متغیر که از تئوری لیاپانوف^{۸۵} استفاده می‌کند، ارتعاشات در سازه چند درجه آزادی به طور موثری تقلیل یافته است. آن‌ها همچنین دستورالعمل‌هایی برای جانمایی بهینه محرک‌ها برای کاربردهای سازه‌ای ارائه نمودند.

یانگ^{۸۶} و همکاران یک روش کنترل باز تنظیمی^{۸۷} عمومی بر پایه تئوری لیاپانوف را برای یک میراگر سختی نیمهفعال باز تنظیم شونده (RSASD)^{۸۸} پیشنهاد دادند [۴۹]. عملکرد این کنترل‌را باز تنظیمی و همچنین یک کنترل قطع و وصل شونده با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی گستردۀ تحت انواع مختلف زلزله‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. در این ارزیابی اثر زلزله‌های حوزه نزدیک (ال سنترو، کوبه- تاکاتوری، نورث‌ریدج- سنتا مونیکا) و همچنین زلزله‌هایی با محتوای فرکانسی پایین (مکزیکو- SE) نیز مد نظر قرار گرفت. برای شبیه‌سازی عددی از یک ساختمان سه طبقه مقیاس شده و یک

⁸¹ Jabbari

⁸² Actuator

⁸³ Thai

⁸⁴ Pneumatic actuator

⁸⁵ Lyapunov

⁸⁶ Yang

⁸⁷ Resetting control

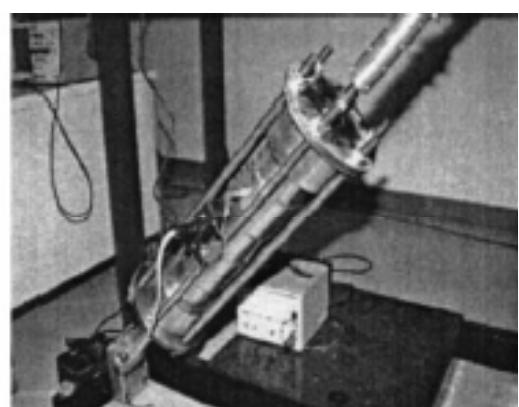
⁸⁸ Resetting semi-active stiffness damper

ساختمان ۸ طبقه با مقیاس کامل استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که یک RSASD بسیار موثرتر از یک میراگر سختی نیمه‌فعال قطع و وصل شونده (SSASD)^{۸۹} در کاهش پاسخ ساختمان قرار گرفته در معرض زلزله عمل می‌نماید. علاوه بر این، عملکرد یک روش کنترلی خاص به نوع سازه و زلزله اعمال شده بستگی دارد.

آگراوال و هی^{۹۰} اثر میراگرهای سختی نیمه‌فعال باز تنظیم شونده (RSASD) و همچنین میراگرهای غیرفعال ویسکوز و اصطکاکی در کاهش ارتعاشات ناشی از زلزله بر روی یک پل کابلی الگو^{۹۱} را با استفاده از شبیه‌سازی عددی مورد ارزیابی قرار دادند [۵۰]. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در صورت استفاده از تجهیزات RSASD تغییر مکان عرضه پل و مقادیر برش و لنگر در پایه دکل‌های پل به طور همزمان کاهش می‌یابد. علاوه بر این اثر کنترلی تجهیزات RSASD بهتر از میراگرهای غیرفعال ویسکوز و اصطکاکی است و قابل مقایسه با نمونه انجام شده با کنترل فعال است. بابر و جباری به منظور کاهش ارتعاشات لرزه‌ای، میراگرهای نیمه‌فعال باز تنظیم شونده را بسط و توسعه دادند [۴۴]. میراگرهای پیشنهاد شده در واقع تجهیزات با سختی متغیر می‌باشند که مانند یک فنر خطی رفتار می‌کنند. نمونه‌هایی از این میراگرها در شکل ۲-۷ نشان داده شده است. سپس این محققین پایداری یک سیستم چند درجه آزادی مجهز به تجهیزات باز تنظیم شونده بادی^{۹۲} را مورد مطالعه قرار دادند.



(ب)



(الف)

شکل ۲-۷- میراگرهای نیمه‌فعال باز تنظیم شونده؛ (الف) میراگر باز تنظیم شونده هیدرولیکی؛ (ب) میراگر باز تنظیم شونده بادی.

⁸⁹ Switching semi-active stiffness damper

⁹⁰ He

⁹¹ Benchmark

⁹² Pneumatic resettable devices

علاوه بر این به منظور یافتن محل مناسب برای نصب این تجهیزات در سازه، چیدمان‌های متفاوت جانمایی تجهیزات باز تنظیم شونده در سیستم چند درجه آزادی به طور عددی و آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که نصب تجهیزات باز تنظیم شونده در طبقات مختلف تاثیرات متفاوتی در مودهای مختلف سازه چند درجه آزادی دارد.

یانگ و آگراوال کارایی ترکیب میراگر سختی نیمه‌فعال باز تنظیم شونده (RSASD) و همچنین میراگر اصطکاکی الکترومغناطیسی نیمه‌فعال (SAEMFD)^{۹۳} را با سیستم جداسازی پایه‌ای و همچنین ترکیب سیستم جداسازی پایه‌ای با تجهیزات غیرفعال متفاوت تحت زلزله‌های حوزه نزدیک مورد ارزیابی و مطالعه قرار دادند [۱۴]. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که سیستم جداسازی پایه‌ای به تنها‌ی قادر به محافظت ساختمان‌ها در برابر زلزله‌های حوزه نزدیک نمی‌باشد. هرچند با افزودن میراگرهای سیال لزج با ظرفیت میرایی بالا و یا میراگرهای ویسکوز با ظرفیت میرایی متوسط و همچنین میراگرهای اصطکاکی، عملکرد ساختمان تقریباً رضایت بخش می‌شود. نتایج همچنین نشان می‌دهد که ترکیب میراگر RSASD و سیستم جداسازی پایه‌ای برای محافظت ایمنی روسازه صلب در برابر زلزله حوزه نزدیک بسیار موثر است. عملکرد این ترکیب با افزودن میراگرهای ویسکوز غیرفعال به آن می‌تواند بهتر نیز شود. به همین ترتیب یک ترکیب از سیستم جداسازی پایه‌ای، میراگر و میراگرهای غیرفعال ویسکوز نیز تحت زلزله‌های حوزه نزدیک عملکرد مناسبی دارند.

جاجاکیسوکما^{۹۴} و همکاران به مطالعه پاسخ میراگرهای سختی نیمه‌فعال (SASD)^{۹۵} در مدل ساختمانی ۵ طبقه تحت چهار رکورد زلزله متفاوت پرداختند. در شکل ۲-۸ شماتیک میراگر و مدل آن نشان داده شده است [۵۱]. بدین منظور روش‌های کنترلی مختلفی برای میراگر SASD در نظر گرفته شد که عبارت بودند از: کنترل باز تنظیمی^{۹۶}، کنترل قطع و وصل^{۹۷}، کنترل LQR^{۹۸} و کنترل LQR اصلاح شده^{۹۹}. سپس نتایج این روش‌های کنترلی با سیستم‌های کنترل نشده و کنترل غیرفعال مقایسه گردید. در روش کنترلی غیرفعال شیرهای وسیله SASD می‌توانند باز یا بسته باشند. در روش

^{۹۳} Semi-active electromagnetic friction damper

^{۹۴} Djajakesukma

^{۹۵} Semi-active stiffness damper

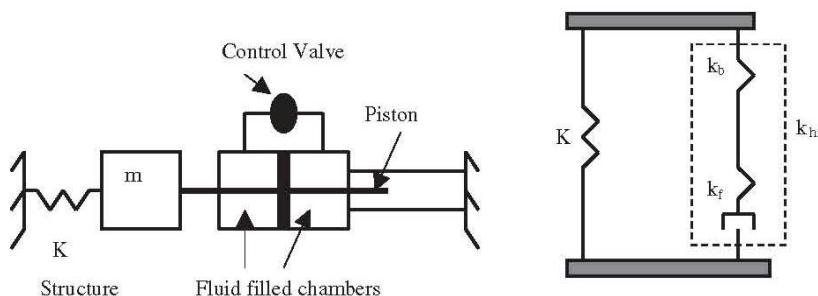
^{۹۶} Resetting control

^{۹۷} Switching control

^{۹۸} Linear quadratic regulator control

^{۹۹} Modified linear quadratic regulator control

کنترلی نیمهفعال دو روش کنترلی متمایز وجود دارد، روش کنترل باز تنظیمی و روش کنترل قطع و وصل. در روش کنترل باز تنظیمی، شیر تخلیه به صورت ناگهانی و به سرعت در یک لحظه زمانی کوتاه باز و بسته میشود اما در روش کنترل قطع و وصل، شیر تخلیه در یک فاصله زمانی معین باز شده و برای مدتی باز مانده و سپس بسته میشود. نتایج به دست آمده نشان داد که تمام روش‌های کنترلی در کاهش پاسخ تغییرمکان طبقات موثر بوده‌اند. روش کنترل غیرفعال همانطوری که انتظار می‌رفت تأثیر کمتری در مقایسه با سایر روش‌های کنترلی داشت. در مقایسه روش‌های کنترلی، روش LQR اصلاح شده بهترین عملکرد را در کاهش پاسخ تغییرمکان طبقات داشته است. کنترل باز تنظیمی، شتاب حداقل طبقه را به شدت افزایش داده است. تمام روش‌های کنترلی باعث افزایش شتاب طبقات پایین ساختمان شده‌اند در حالی که روش کنترل غیرفعال منجر به افزایش شتاب در طبقات بالاتر ساختمان شده است. به طور کلی هر یک از روش‌های کنترلی بسته به نوع زلزله و مشخصات ساختمان مورد مطالعه، درجات حساسیت متفاوتی از خود نشان می‌دهند. با این حال روش کنترلی LQR اصلاح شده توانایی بهینه کردن عملکرد کنترلی را در برابر نوع سازه و زلزله دارا است.



شکل ۲-۸- شماتیک دیاگرام و مدل میراگر SASD [۵۱].

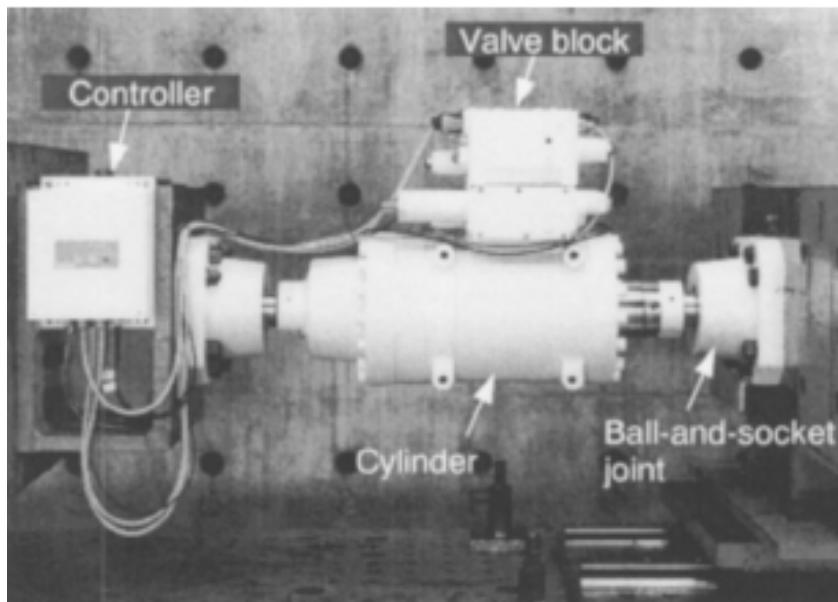
کورینو^{۱۰۰} و همکاران یک میراگر روغنی نیمهفعال را توسعه دادند که قادر به اتلاف انرژی معادل دو برابر انرژی تلف شده توسط میراگرهای غیرفعال متداول از طریق فرمان دادن برای باز نمودن یک شیر باز/بسته^{۱۰۱} مطابق سیگنال ارسالی از کنترلر می‌باشد [۵۲]. روش کنترلی در این میراگر یک روش کنترل حلقه بسته^{۱۰۲} است و هر یک از میراگرهای مجهز به کنترلر و سنسور می‌باشند. به منظور ارزیابی رفتار دینامیکی میراگر پیشنهادی و همچنین عملکرد الگوریتم کنترلی ارائه شده

¹⁰⁰ Kurino

¹⁰¹ On/Off valve

¹⁰² Closed loop

یک سری آزمایش‌های دینامیکی بر روی میراگر در مقیاس واقعی انجام شد (شکل ۲-۹). نتایج آزمایش‌ها حاکی از رفتار پایدار میراگر تحت بارگذاری غیر یکنواخت و همچنین بارگذاری سینوسی است، به علاوه این که ظرفیت اتلاف انرژی نیز بهبود یافته است. نتایج همچنین نشان می‌دهد که رفتار دینامیکی میراگر را می‌توان با دقت مناسبی با استفاده از پارامترهای تحلیلی مدل‌سازی نمود.



شکل ۲-۹- نمای خارجی میراگر و کنترلر با مقیاس واقعی [۵۲].

آگراوال و همکاران عملکرد سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال شامل میراگر سختی نیمه‌فعال باز تنظیمی (RSASD)، میراگر سختی نیمه‌فعال قطع و وصل شونده (SSASD)، میراگر اصطکاکی نیمه‌فعال (SAFD)¹⁰³ را در ترکیب با فنر خطی به علاوه میراگرهای ویسکوز خطی و غیرخطی در پل‌های کابلی مورد ارزیابی قرار دادند [۵۳]. نتایج نشان می‌دهد که تجهیزات غیرفعال و نیمه‌فعال در کاهش مقادیر پاسخ حداکثر پل، در یک سطح قابل مقایسه با نمونه مجهز به سیستم کنترلی فعال با محدودیت‌های نیرویی یکسان، قرار دارند.

بوروسو¹⁰⁴ و همکاران توانایی تجهیزات باز تنظیم شونده نیمه‌فعال در کاهش پاسخ سازه‌ها در صورت وجود هیسترزیس، هندسه، و تسلیم غیرخطی در ساختمان را تحت زلزله‌هایی با شدت‌های متفاوت مورد ارزیابی و مطالعه قرار دادند [۵۴]. علاوه بر این اثر جانمایی این تجهیزات در میزان

¹⁰³ Semi-active friction damper

¹⁰⁴ Borroso

سودمندی کنترل سازه‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که میراگرهاي تنظيم شونده‌اي که داراي نيري حداکثر يا سطح اتلاف انرژي در حدود ۱۳٪ وزن ساختمان می‌باشنند، می‌توانند تغيير مکان‌هاي دائمي ساختمان را به طور موثر محدود نمایند. هرچند با محدود نمودن تغيير مکان، شتاب طبقات به شدت افزایش می‌يابد و بهبود عملکرد برای تمام انواع زلزله‌ها يكسان نمی‌باشد. به دليل حاكم بودن مود اول در سازه مورد مطالعه، بيشترین ميزان کاهش در جابجايی نسبی^{۱۰۵} حداکثر و جابجايی دائمي سازه هنگامي مشاهده شد که بيشترین تعداد تجهيزات در پايه سازه نصب شدند. علاوه بر اين نتایج نشان می‌دهد که نحوه چيدمان بهينه تجهيزات برای حصول بهترین نتيجه، تقریباً به برش طبقه بستگی دارد.

شيميزو^{۱۰۶} و همكاران يك آزمایش ارتعاش اجباری را بر روی يك ساختمان بلند مرتبه با پریود طبیعی حدود ۴ ثانیه انجام دادند [۵۵]. این آزمایش برای بررسی عملکرد میراگر روغنى قطع و وصل شونده نيمه فعال تحت ارتعاشات کوچک فرکانس پايانن صورت پذيرفت. نتایج نشان می‌دهد که میراگرهاي تست شده از يك تغيير مکان بسيار کوچک حدود ۱/۰ ميليمتر شروع به کار کردن می‌کنند و نسبت ميرايي را حدود ۱/۶ برابر بيشتر از ميراگر غيرفعال معمولی افزایش می‌دهند. علاوه بر اين، ساختمان تست شده داراي سيسitem مشاهده و اندازه‌گيري زلزله و باد است و تأثير ميراگرها در برابر زلزله‌هاي کوچک از روی رکوردهای ثبت شده نيز به اثبات رسیده است. در شکل ۲ - ۱۰ ميراگر روغنى نصب شده در سازه نشان داده شده است.

لوويت^{۱۰۷} و همكاران اثر تجهيزات سختي متغير نيمه فعال^{۱۰۸} را در کاهش ارتعاشات سازه‌ها مطالعه کرده و عملکرد آن را با تجهيزات ميرايي مقايسه نمودند [۵۶]. مزيت عمدت تجهيزات سختي متغير برای استخراج انرژي از سازه در مقايسه با تجهيزات ميرايي در مواجهه با بارهای ضربه‌ای، عدم انتقال نiroهای بزرگ به سازه می‌باشد. علت اين امر آن است که سرعت‌های بالای اعمال شده به سازه در بارهای ضربه‌ای باعث به وجود آمدن نiroهای بزرگ در ميراگرهاي متداول می‌شوند در حالی که نيري چندانی در تجهيزات سختي متغير ايجاد نمی‌کنند. يك مقايسه از تجهيزات باز تنظيمی با ميراگر MR در يك سازه يكسان نشان می‌دهد که هر دو وسیله تقریباً عملکرد يكسانی داشته و هر دو

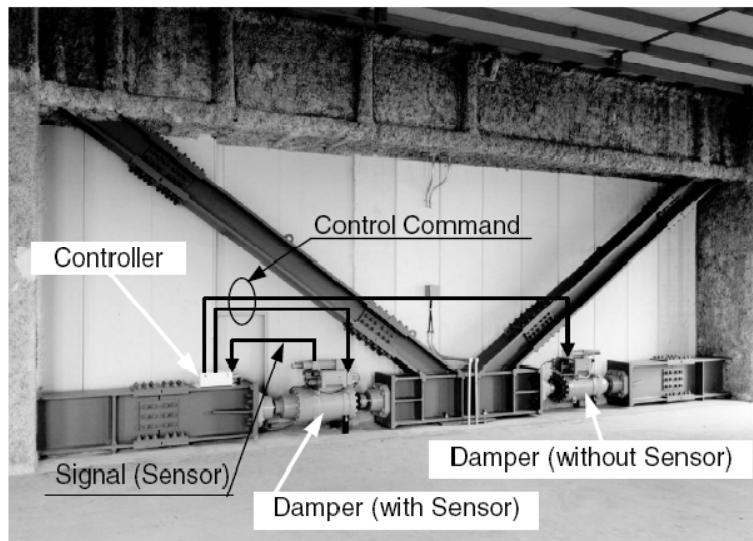
¹⁰⁵ Drift

¹⁰⁶ Shimizu

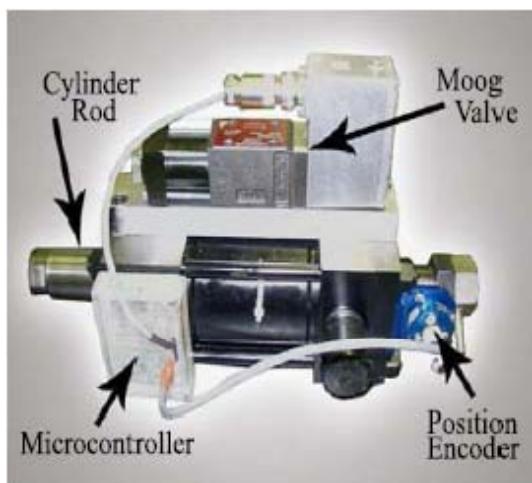
¹⁰⁷ Leavitt

¹⁰⁸ Semi-active variable stiffness devices

بهبود قابل ملاحظه‌ای در عملکرد سازه نسبت به حالت بدون کنترل نشان می‌دهند. یک نمونه از میراگر سختی متغیر به کار رفته در این تحقیق در شکل ۲-۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۰- میراگر روغنی نیمهفعال نصب شده در ساختمان مورد مطالعه [۵۵].



شکل ۲-۱۱- میراگر سختی متغیر با ظرفیت نیرویی ۳۰،۰۰۰ پند [۵۶].

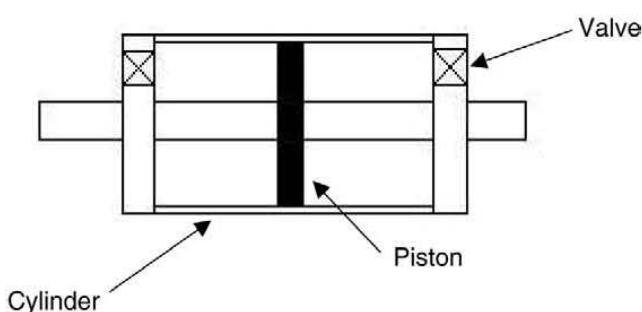
چیس^{۱۰۹} و همکاران یک وسیله قابل تنظیم مجدد با مقیاس یک پنجم که از هوا به عنوان سیال کاربردی استفاده می‌کرد را طراحی، تحلیل و تست نمودند [۵۷]. طراحی وسیله پیشنهادی به گونه‌ای است که نیاز به اتلاف انرژی ذخیره شده به صورت آنی و سریع را حذف نماید. این امر با

¹⁰⁹ Chase

استفاده از طراحی دو-محفظه‌ای^{۱۱۰} که از هر سمت پیستون به طور مستقل استفاده می‌نماید، صورت می‌پذیرد. در این وسیله پیشنهادی از هوا به عنوان سیال کاربردی استفاده شده است تا بتوان از هوای محیط به عنوان مخزن ذخیره سیال استفاده نمود. در شکل ۲-۱۲ شماتیک میراگر دو-محفظه‌ای و همچنین نمونه آزمایشگاهی میراگر تست شده نشان داده شده است. مشخصات دینامیکی و نیرویی میراگر با استفاده از تست‌های آزمایشگاهی به اثبات رسیده‌اند. اثر روش‌های مختلف کنترلی به ویژه با در نظر گرفتن شکل حلقه‌های هیسترزیس منتجه بررسی گردیده است. نتایج طیف پاسخ نشان می‌دهد که با استفاده از روش کنترلی ۴-۱ یا ۴-۲، رفتار سازه نسبت به حالت بدون کنترل به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌یابد. علاوه بر این روش کنترلی ۴-۲ این قابلیت را دارد که به عنوان یک روش مناسب در کاربردهای مقاوم‌سازی استفاده شود چرا که باعث افزایش برش پایه سازه نمی‌شود.



(ب)



(الف)

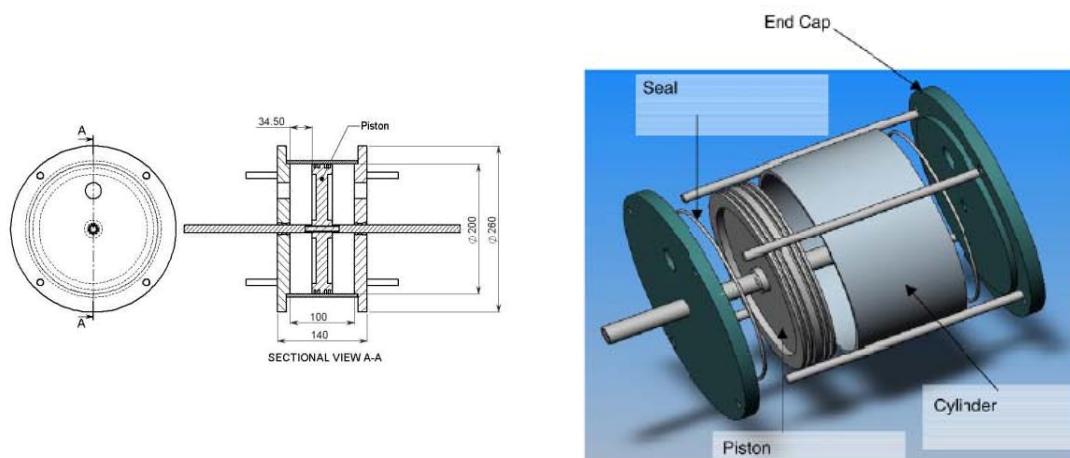
شکل ۲-۱۲- (الف) شماتیک میراگر دو-محفظه‌ای؛ (ب) نمونه آزمایشگاهی میراگر تست شده [۵۷].

لوبیت و همکاران یک میراگر باز تنظیم شونده نیمه‌فعال که در آن از گاز با فشار بالا به عنوان سیال عملکردی استفاده شده بود را در یک ساختمان جداسازی شده پایه‌ای الگو به کار برداشتند.^[۵۸] عملکرد میراگر باز تنظیم شونده نیمه‌فعال با استفاده از شبیه‌سازی عددی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که این تجهیزات یک عملکرد کلی قابل مقایسه با سایر تجهیزات نیمه‌فعال ارائه می‌دهند.

چیس و همکاران رفتار هیسترزیس تجهیزات میراگر نیمه‌فعال با قابلیت تنظیم شوندگی مجدد را بررسی نمودند^[۵۹]. با توجه به کمبود تحقیقات و آزمایش‌های انجام شده بر روی (SARD)

^{۱۱۰} Two-chambered

مدل‌هایی با مقیاس بزرگ از این تجهیزات، چیس و همکاران یک مدل با مقیاس یک پنجم از این تجهیزات را که در آن از هوا به عنوان سیال عملکردی استفاده شده، طراحی و آزمایش نمودند. این وسیله ابداعی به گونه‌ای است که هر یک از مخازن آن می‌تواند به طور مستقل عمل نماید. این دیدگاه باعث می‌شود که هر سمت پیستون به جای آن که با استفاده از لوله کنارگذر و شیر کنترلی به یکدیگر متصل شوند، به عنوان یک مخزن مستقل با شیر و کنترل مختص به خود عمل نماید. با توجه به این که از هوا به عنوان سیال عملکردی در این وسیله استفاده شده و با توجه به این نکته که محیط پیرامونی به عنوان مخزن ذخیره سیال عمل می‌کند، لذا فشار اولیه مخزن ثابت بوده (فشار اولیه معادل فشار اتمسفر است) و قابل تنظیم نمی‌باشد. در شکل ۲-۱۳ مشخصات و ابعاد میراگر مطالعه شده نمایش داده شده است.



شکل ۲-۱۳- میراگر دو محفظه‌ای مطالعه شده توسط [۵۹].

مشخصات دینامیکی و نیرویی این وسیله با استفاده از آزمایش‌ها و بررسی پاسخ آن به سیگنال‌های ورودی مختلف، به دست آمد. علاوه بر این اثرات انواع روش‌های کنترلی که موجب افزایش میرایی می‌گردد، بررسی گردید. توجه ویژه در این تحقیق بر روی مقدار زمان لازم برای اتلاف مقادیر زیاد انرژی و تأثیر آن بر عملکرد سیستم معطوف گردید. همچنین اثر روش‌های مختلف کنترلی بر روی حلقه‌های هیسترزیس نیز بررسی شد. سپس یک مدل تحلیلی تعیین گردید و مشخصات این مدل به صورت آزمایشگاهی مورد تایید قرار گرفت. در نهایت توانایی این نوع از تجهیزات در کاهش پاسخ‌های یک سازه در خلال زلزله با استفاده از مدل غیرخطی این تجهیزات که توسط آزمایش‌های تایید شده، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که برای تغییرمکان‌های پیستون با دامنه یکسان، نیروی

مقاوم تولید شده در فرکانس‌های تحریک بالاتر، بزرگ‌تر است. دلیل این امر انباستگی هوا در مخزن و پایین بودن نرخ خروج هوا نسبت به فرکانس تحریک است که باعث بالا رفتن فشار مخزن و در نتیجه افزایش نیروی مقام وسیله می‌شود. بنابراین برای فرکانس‌های بالاتر تحریک، نیاز به شیرهای تخلیه بزرگ‌تر یا افزایش تعداد شیرهای تخلیه برای خروج به موقع هوای فشرده شده لازم است. در این تحقیق پاسخ طیفی برای سه رکورد زلزله مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از بهبود قابل ملاحظه در پاسخ طیفی برای روش کنترل ۱-۴ و همچنین روش کنترل ۲-۴ در مقایسه با حالت کنترل نشده برای مقادیر مختلف سختی نسبی وسیله به سختی سازه‌ای، است.

مولیگان^{۱۱۱} و همکاران یک سیستم دیوار گهواره‌ای^{۱۱۲} مقیاس شده مجهز به میراگر قابل تنظیم مجدد نیمه‌فعال را به روش آزمایش هایبرید^{۱۱۳} سرعت بالای همزمان^{۱۱۴} تحت مجموعه‌ای از زلزله‌ها مورد مطالعه قرار دادند [۶۰]. در شکل ۲-۱۴ شماتیک سیستم دیوار گهواره‌ای به همراه میراگر باز تنظیم شونده نشان داده شده است. میراگر نیمه‌فعال به گونه‌ای کنترل می‌شود که فقط در برابر حرکت گهواره‌ای بالارونده دیوار مقاومت اضافی فراهم نماید. نتایج نشان می‌دهد که میراگر نیمه‌فعال می‌تواند دوران حداکثر سیستم دیوار گهواره‌ای را به طور موثری کاهش داده و باعث افزایش عملکرد آن و همچنین افزایش انرژی تلف شده بشود. اختلاف در نتایج به دست آمده تحت زلزله‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که برای دیوار گهواره‌ای مطالعه شده، نتایج بسیار وابسته به نوع زلزله می‌باشند. علاوه بر این، مدل تحلیلی غیرخطی میراگر با مقایسه نتایج حاصل از آزمایش ترکیبی و نتایج تحلیلی به دست آمده تحت زلزله‌های مطالعه شده، مورد تایید قرار گرفت.

لویت و همکاران یک دیدگاه کنترلی بهینه را برای محرک‌های سختی متغیر^{۱۱۵} حاوی گاز نیتروژن تحت فشار پیشنهاد دادند [۶۱]. آن‌ها نشان دادند که تکنینک کنترل باز تنظیمی سریع‌ترین روش برای حذف انرژی از یک سازه مرتיעش شونده مجهز به محرک سختی متغیر است. نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی حاکی از آن است که روش کنترلی باز تنظیمی مناسب‌ترین روش برای کاربرد در سازه‌ها با مقیاس واقعی است.

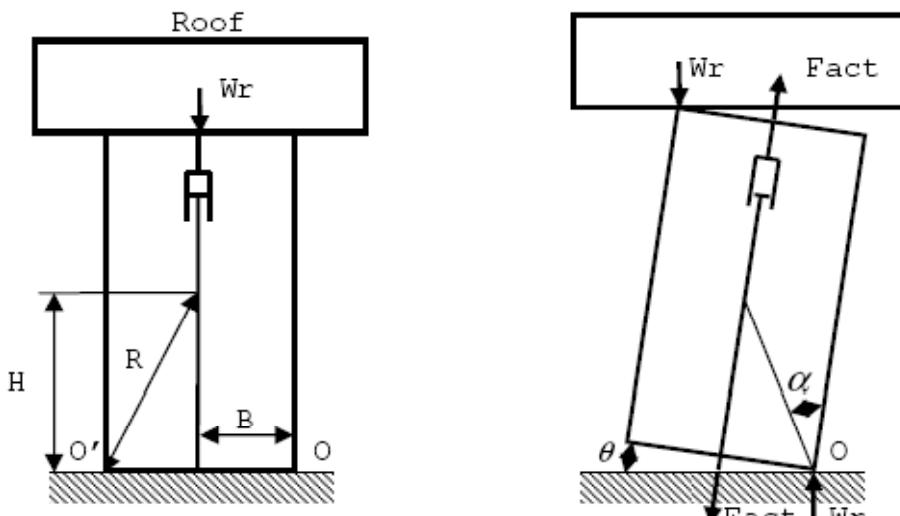
¹¹¹ Mulligan

¹¹² Rocking wall

¹¹³ Hybrid testing

¹¹⁴ Real-time

¹¹⁵ Variable stiffness actuators



شکل ۲-۲- شماتیک سیستم دیوار گهواره‌ای به همراه میراگر باز تنظیم شونده [۶۰].

یانگ و همکاران یک میراگر سخت نیمه‌فعال باز تنظیم شونده (RSASD) که با گاز تحت فشار کار می‌کرد را طراحی کرده و یک نمونه با مقیاس واقعی ساختند [۶۲]. آزمایش‌هایی با مقیاس واقعی برای به دست آوردن رفتار هیسترتیک این میراگر و همچنین به دست آوردن رابطه بین سختی میراگر و فشار گاز انجام شد. تطبیق بین نتایج آزمایشگاهی به دست آمده برای حلقه‌های هیسترزیس میراگرهای RSASD و نتایج به دست آمده از روابط تئوری به صورت کیفی انجام پذیرفت. نتایج آزمایشگاهی حاکی از وجود یک رابطه خطی بین فشار گاز و سختی میراگر است که پیش‌تر به صورت تئوری پیش‌بینی شده بود. در نهایت آزمایش میز لرزان به روی قاب فولادی ۳ طبقه با مقیاس تقریباً واقعی که به میراگرهای RSASD با مقیاس واقعی مجهز شده بود، انجام شد (شکل ۲-۱۵). این سازه تحت زلزله‌های مختلف کوبه، چی‌چی (TCU076)، ال سنترو که دو زلزله اول دارای مشخصات زلزله‌های حوزه نزدیک می‌باشند، قرار گرفت. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که میراگرهای RSASD با مقیاس واقعی به طور کاملاً مؤثری تغییرمکان نسبی حداقل و همچنین تغییرمکان نسبی RMS (جذر میانگین مربعات)^{۱۱۶} را تحت زلزله‌های نزدیک گسل آزمایش شده کاهش داده‌اند. اگرچه عملکرد میراگرهای RSASD در کاهش شتاب حداقل طبقه تأثیر کمتری داشته، اما این میراگرهای RMS شتاب طبقات را به طور عمده‌ای کاهش داده‌اند.

^{۱۱۶} Root mean square



(ب)



(الف)

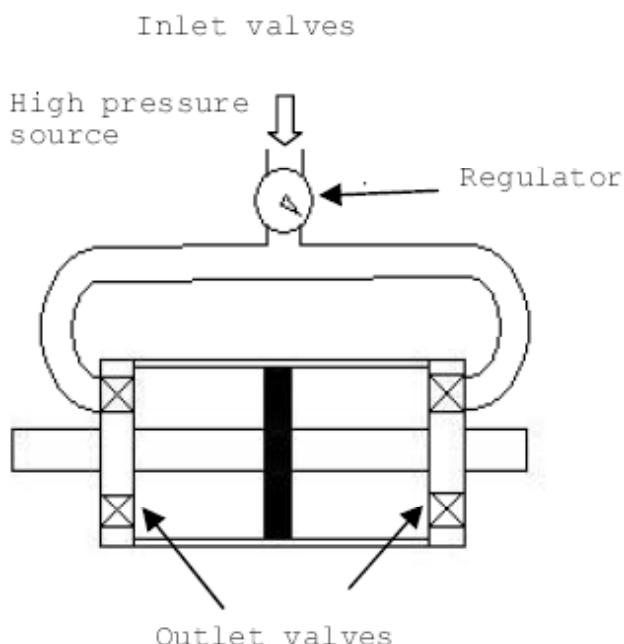
شکل ۲-۱۵- (الف) قاب سه طبقه آزمایش شده بر روی میز لرزان؛ (ب) میراگر RSASD نصب شده در طبقه اول [۶۲].

رودگرز^{۱۱۷} و همکاران با استفاده از تجهیزات نیمهفعال باز تنظیم شونده دو محفظه‌ای سه روش مختلف برای ایجاد تغییرات در منحنی هیسترزیس سازه‌ای از دیدگاه طراحی لرزه‌ای بر اساس عملکرد را به صورت آماری مورد بررسی قرار دادند [۶۳]. در این تحقیق از تجهیزات باز تنظیم شونده دو-محفظه‌ای جدیدی استفاده شد که شیرهای آن به صورت مستقل کنترل می‌شوند و توانایی آن را دارند که به صورت نیمهفعال رفتار هیسترزیس سازه را تغییر دهند. تنها مکانیزم کنترلی که در تجهیزات SARD استفاده می‌شود، فعال کردن شیرها در یک زمان حدود ۲۰ میلی‌ثانیه است. زمان عکس العمل شیرهای کنترلی از پاسخ دینامیکی اغلب سیستم‌های سازه‌ای سریع‌تر است بنابراین اثر متقابل کنترل شیرها با سازه بسیار کم است. به منظور بررسی تأثیر روش‌های کنترلی مختلف بر روی یک سازه یک درجه آزاد که در آن یک میراگر نیمهفعال نصب شده است، از یک مدل با میرایی ذاتی ۵٪ استفاده شده است. در این تحقیق از سه دسته زلزله به کار رفته در پروژه SAC استفاده شده است که به ترتیب معرف زلزله‌های خفیف، متوسط و شدید می‌باشند. طیف پاسخ برای این سه دسته زلزله تهیه شد و نمودار طیف پاسخ در محدوده پریودی بین ۰/۵ تا ۲/۵ ثانیه (که محدوده مورد توجه

¹¹⁷ Rodgers

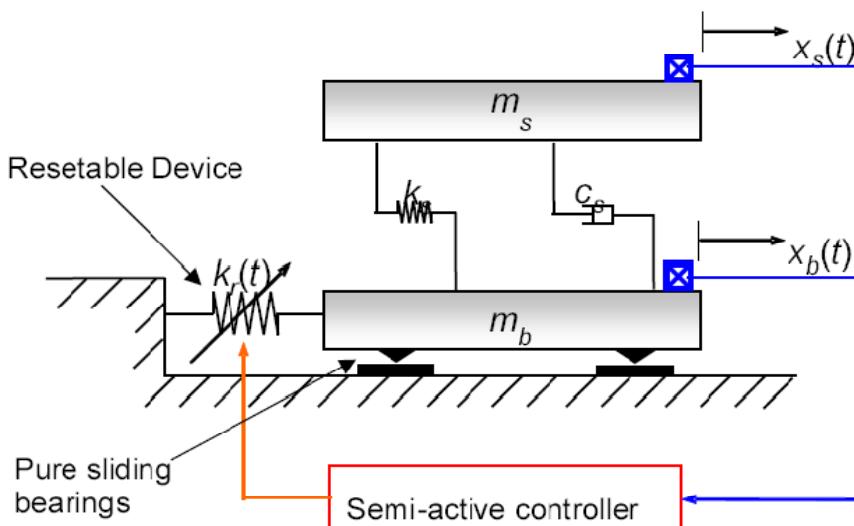
و مهم در طراحی لرزاها است) برای تغییر مکان سازه‌ای، نیروی سازه‌ای و برش پایه کل ترسیم شده است. نتایج نشان می‌دهد که کاهش پاسخ‌ها به شدت به نوع زلزله‌های انتخاب شده بستگی دارد. ضریب کاهش نیروی سازه‌ای و برش پایه کل برای بیشتر زلزله‌ها تغییر نداشته و در محدوده پریودی بین ۵/۰ تا ۲/۵ ثانیه تقریباً ثابت است. همچنین نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که روش کنترلی ۴-۲ تنها روشی است که علاوه بر کاهش پاسخ تغییر مکان و نیروی سازه‌ای، برش پایه کل را نیز کاهش می‌دهند.

مولیگان و همکاران به مطالعه تأثیر استفاده از مخزن هوای فشرده به منظور افزایش نیروی حداکثر تولید شده توسط میراگر نیمه‌فعال باز تنظیم شونده دو-محفظه‌ای پرداختند [۶۴]. نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از مخزن هوای فشرده پاسخ میراگر نسبت به حالت طراحی با دو شیر مجزا که با فشار اتمسفر کار می‌کرد، بیشتر قابل تغییر است. نرخ اتلاف انرژی به تعداد و همچنین اندازه روزنه شیرهای خروجی بستگی دارد ضمن آن که کنترل نرخ خروج هوا تغییر رفتار هیسیرزیس میراگر را تحت شعاع قرار می‌دهد. علاوه بر این، مدل تحلیلی ارائه شده قادر است نتایج آزمایشگاهی را به طور دقیق پیش‌بینی نماید و می‌تواند برای مدل‌سازی دینامیکی میراگر در کاربردهای عملی مورد استفاده قرار گیرد. شماتیک میراگر مطالعه شده در شکل ۲-۱۶ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۶ - شماتیک میراگر باز تنظیم شونده دو-محفظه‌ای متصل به مخزن هوای فشرده [۶۴].

چیس و همکاران یک سازه جداسازی شده از پایه مجهز به تجهیزات باز تنظیم شونده نیمهفعال دو-محفظه‌ای را تحت سه دسته زلزله مورد مطالعه قرار دادند [۶۵]. شماتیک سیستم مدل شده در شکل ۲-۱۷ نشان داده شده است. سپس نتایج به دست آمده را با سیستم‌های جداسازی شده از پایه غیرفعال واقعی مقایسه نمودند. نتایج حاکی از عملی بودن استفاده از تجهیزات باز تنظیم شونده نیمهفعال است که قابلیت تغییر پاسخ هیسترزیس را دارند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که برای زلزله‌های مطالعه شده، سیستم نیمهفعال بهبود قابل ملاحظه‌ای در جداسازی و محافظت در برابر خسارت در مقایسه با سیستم جداسازی شده از پایه غیرفعال به وجود آورده است. تنها اشکال عمده، بیش از حد بودن تغییرمکان پایه و تغییرمکان نهایی نسبت به مقادیر قابل قبول در سیستم‌های جداسازی غیرفعال در زلزله‌های بسیار بزرگ است.



شکل ۲-۱۷- شماتیک سیستم جداسازی شده از پایه مجهز به تجهیزات باز تنظیم شونده نیمهفعال دو-محفظه‌ای که در آن b و s معرف پایه و s معرف سازه جداسازی شده است [۶۵].

چی^{۱۱۸} و همکاران عملکرد لرزه‌ای یک ساختمان چند طبقه را با سیستم میراگر جرمی تنظیم شده (TMD)^{۱۱۹} به دو صورت نیمهفعال و غیرفعال برای یک قاب خمشی مقاوم ۱۲ طبقه به دو صورت ۲+۱۰ طبقه و ۴+۸ طبقه مورد مطالعه قرار دادند [۶۶]. طبقات بالایی از سازه جداسده و به صورت جرم تنظیم شده عمل می‌نمایند که در آن‌ها یک میراگر ویسکوز غیرفعال یا میراگر باز تنظیم

¹¹⁸ Chey

¹¹⁹ Tuned mass damper

شونده نیمه‌فعال به عنوان اتلاف کننده انرژی در نظر گرفته شده است. نتایج ضریب کاهش نرمالایز شده و تحلیل‌های تاریخچه زمانی نشان می‌دهند که سیستم ساختمانی TMD باعث کاهش قابل ملاحظه‌ای در شاخص‌های کنترلی برای تمام زلزله‌های مطالعه شده می‌شود، هرچند که شتاب در محل طبقه ایزوله شده افزایش می‌یابد.

فرانکو-آنایا^{۱۲۰} و همکاران عملکرد لرزه‌ای یک سازه چهار طبقه مجهز به میراگرهای باز تنظیم شونده نیمه‌فعال دو-محفظه‌ای با مقیاس یک پنجم را مورد مطالعه قرار دادند (شکل ۲-۱۸) [۶۷]. به منظور ارزیابی کارایی میراگرهای سازه، آزمایش‌های میز لرزان بر روی سازه انجام شد. سازه مورد آزمایش تحت تأثیر زلزله‌های شبیه‌سازی شده مختلف با شتاب حداقل متفاوت قرار گرفت. نتایج آزمایش‌های میز لرزان تایید می‌کند که میراگرهای باز تنظیم شونده برای محدوده گسترده‌ای از حریکات زمین‌لرزه به طور کاملاً موثری پاسخ‌های سازه‌ای را کاهش می‌دهند. این امر نشان دهنده پتانسیل عمده این تجهیزات برای محافظت لرزه‌ای سازه‌های ساختمانی است. همچنین این محققین کارایی میراگرهای باز تنظیم شونده را در کاهش پاسخ لرزه‌ای یک ساختمان بتنی مسلح ۱۲ طبقه مورد مطالعه قرار دادند. به منظور تعیین نحوه بهینه به کارگیری این میراگرهای سازه، تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج تحلیل‌ها دو جنبه مهم در به کارگیری میراگرهای باز تنظیم شونده در ساختمان‌های واقعی را روشن می‌نماید که عبارتند از: نحوه توزیع میراگرهای سازه و نوع روش کنترلی مورد استفاده در این میراگرهای.

چن^{۱۲۱} و همکاران یک میراگر باز تنظیم شونده با مقیاس یک پنجم که در آن از هوا به عنوان سیال کاربردی استفاده شده بود را طراحی، تحلیل و آزمایش نمودند [۶۸]. اثر و کارایی روش‌های کنترلی مختلف به منظور کاهش تقاضای سازه در هنگام وقوع زلزله مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور تایید صحت عملکرد میراگر پیشنهادی برای افزایش پتانسیل استفاده عملی، این میراگر به سه طریق مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. ابتداً مدل‌های رفتاری اولیه به تایید رسیدند. سپس آزمایش هایبرید^{۱۲۲} (hardware-in-loop) با استفاده از یک مدل کامپیوتری برای سازه مورد آزمایش به منظور نشان دادن توانایی کاهش پاسخ سازه و تایید رفتار دینامیکی میراگر برای زمین‌لرزه‌های واقعی، انجام

¹²⁰ Franco-Anaya

¹²¹ Chen

¹²² Hybrid testing

شد. در نهایت آزمایش میز لرزان با مقیاس بزرگ بر روی یک سازه با مقیاس یک پنجم تحت زلزله‌هایی با مقیاس واقعی انجام شد. در شکل ۲-۱۹ نمای نزدیک میراگر دو-محفظه‌ای متصل به سازه آزمایش شده نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۸- سازه چهار طبقه آزمایش شده مجهز به میراگرهای باز تنظیم شونده دو-محفظه‌ای [۶۷].

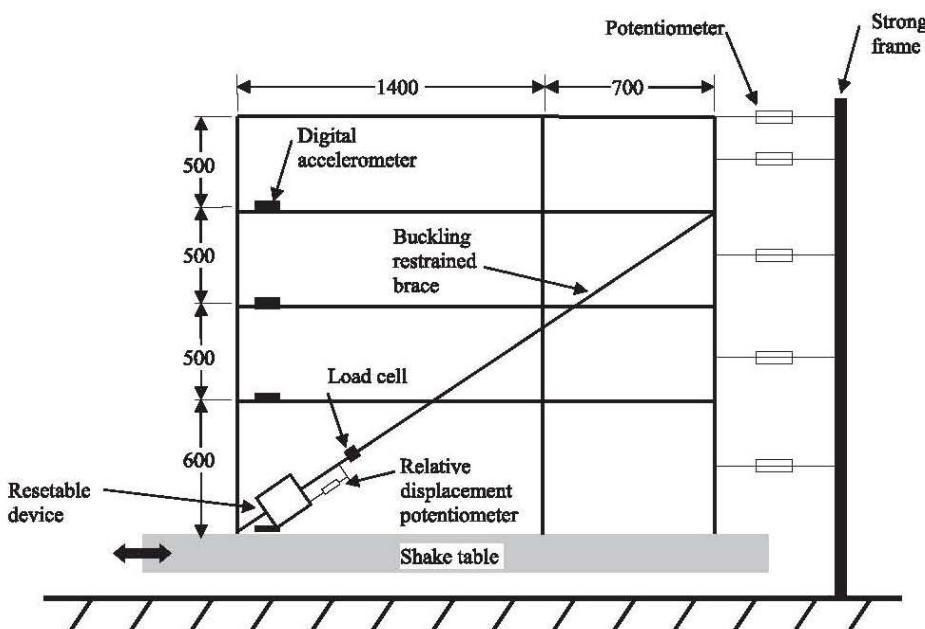


شکل ۲-۱۹- نمای نزدیک میراگر دو-محفظه‌ای متصل به سازه مورد آزمایش به همراه سنسور تغییرمکان (به صورت موازی با میراگر) و سنسور نیرو (در امتداد شفت) [۶۸].

علاوه بر این یک مدل رفتاری تفصیلی توسعه داده شد و این مدل با استفاده از میراگرهای پیشرفته تر و تقویت شده به تایید رسید. این میراگرهای از مخازن هوای فشردهای استفاده می کنند که قابلیت کنترل فعال به منظور افزایش نیروی مقاوم میراگر را دارد که این امر باعث افزایش نسبت نیروی مقاوم به حجم میراگر می شود. نتایج نشان می دهد که نیروی میراگر می تواند تا شش برابر افزایش یابد. همچنین نتایج آزمایش های سینوسی انجام شده بر روی میراگر صحت مدل رفتاری تفصیلی ارائه شده را تایید می نماید که با خطایی کمتر از ۵٪ تا ۷٪ در چرخه های هیسترزیس محاسبه شده است. تمام نتایج نشان می دهد که میراگر پیشنهادی توانایی اساسی برای تغییر پاسخ هیسترزیس کلی یک سازه بزرگ و یا یک سازه با مقیاس واقعی را دارا می باشد.

مولیگان و همکاران عملکرد لرزه ای یک سازه چهار طبقه در مقیاس یک پنجم که در آن تجهیزات نیمه فعال باز تنظیم شونده (SARD) نصب شده بود را بر روی میز لرزان بررسی نمودند [۶۹]. سازه مورد آزمایش به گونه ای طراحی گردید که پریود آن با پریود سازه با مقیاس واقعی برابر باشد. در این سازه تجهیزات باز تنظیم شونده با استفاده از یک مهاربند تقریباً صلب که در برابر کمانش مهار شده است، بین زمین و طبقه سوم نصب شدند. در شکل ۲-۲ وضعیت قرارگیری میراگر و تجهیزات اندازه گیری نشان داده شده است. طبیعت انجام آزمایش ایجاب می کند که از روش های کنترلی مختلفی استفاده شود. بدین منظور از روش کنترل ۱-۴ (اتلاف انرژی در ربع های ۱ تا ۴ منحنی نیرو - تغییر مکان اتفاق می افتد) و روش ۲-۴ (اتلاف انرژی فقط در ربع های ۲ و ۴ منحنی نیرو - تغییر مکان اتفاق می افتد) به گونه ای استفاده گردید که بتوان در صورت لزوم از هر کدام از روش ها استفاده نمود و بسته به پاسخ سازه از روش کنترل ۱-۴ به روش کنترل ۲-۴ تغییر وضعیت داد. همچنین نتایج برای حالت با خرابی امن که در آن شیرهای تخلیه بسته هستند نیز مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت این نتایج با حالت بدون کنترل که در آن هیچ گونه تجهیزات و مهاربندی وجود ندارد، مقایسه گردید. نتایج نشان می دهد که روش ۱-۴ فقط ۱۰٪ بیش از روش ۲-۴ توانسته است پاسخ تغییر مکان سازه را کاهش دهد در حالی که با مقایسه نیروی برش پایه مشاهده می شود روش کنترل ۱-۴ باعث افزایش ۳۳ درصدی نسبت به روش کنترلی ۲-۴ شده است. با مقایسه پاسخ های روش کنترلی ۲-۴ با حالتی که شیرها باز هستند (این حالت بیانگر سیستم بدون اعمال کنترل است)، مشاهده می شود با استفاده از روش ۲-۴ یک کاهش کلی در پاسخ ها به وجود می آید در حالی که برای

روش کنترلی ۴-۱ میزان برش پایه بیشتر از حالت کنترل نشده است. در واقع روش ۴-۲ تنها روشی است که منجر به کاهش پاسخ‌ها در هر سه پارامتر اندازه‌گیری شده یعنی تغییرمکان، شتاب طبقات و برش پایه شده است. همچنین این محققین از ترکیت روش‌های کنترلی به منظور استفاده مناسب‌تر از مزایای هر یک از روش‌های کنترلی برای بهبود عملکرد سازه در زمین‌لرزه‌های مختلف و همچنین زمین‌لرزه‌های شدید استفاده کردند. لذا ابتدا از روش کنترل ۴-۱ استفاده نمودند و هنگامی که تغییرمکان به وجود آمده در پیستون از ۷ میلیمتر تجاوز نمود، روش کنترلی به روش ۴-۲ تغییر پیدا کرد. در این آزمایش تغییرمکان ۷ میلیمتر معرف یک تحريك شدید در سازه است. به طور کلی آزمایش‌های میز لرزان انجام شده نشان دهنده موثر بودن تجهیزات SARD به عنوان یک روش کنترل سازه‌ای می‌باشد.



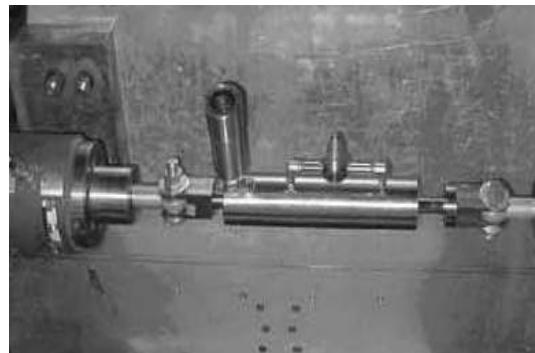
شکل ۲-۲۰- شماتیک سازه آزمایش شده و وضعیت قرارگیری تجهیزات اندازه‌گیری (ابعاد بر حسب میلیمتر می‌باشد) [۶۹].

ناگاراجایا^{۱۲۳} و همکاران یک میراگر- فنر سیالی غیرفعال قابل تطبیق جدید (ASD)^{۱۲۴} را ارائه نموده و آزمایش کردند (شکل ۲-۲۱) [۷۰]. ASD این قابلیت را دارد که سختی و میرایی را به طور مستقل تغییر دهد لذا این وسیله می‌تواند به عنوان یک میراگر تنظیم پذیر و یا یک فنر سیالی تنظیم

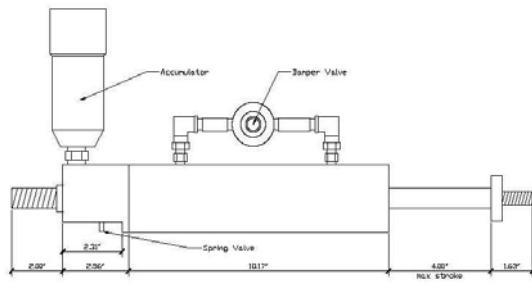
¹²³ Nagarajaiah

¹²⁴ Adaptive passive fluid spring and damper

پذیر و یا به عنوان یک میراگر-فنر ترکیبی به کار رود. آزمایش‌هایی با استفاده از بارگذاری سینوسی و بارگذاری مثلثی بر روی نمونه اولیه انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که ASD می‌تواند مشخصات سختی و میرایی را به طور موثری تغییر دهد به گونه‌ای که با تنظیم کردن شیر فنر و شیر میرایی می‌توان تغییرات عمدی‌ای در شکل منحنی نیرو-تغییرمکان یا حلقه‌های هیسترزیس ایجاد نمود.



(ب)



(الف)

شکل ۲-۲۱- (الف) ابعاد میراگر ASD و موقعیت قرارگیری شیرها؛ (ب) چیدمان آزمایش.

مولیگان و همکاران یک مدل غیرخطی را برای میراگر باز تنظیم شونده نیمه‌فعال دو-محفظه‌ای توسعه دادند [۷۱]. عوامل غیرخطی که می‌توانند عملکرد تجهیزات باز تنظیم شونده را به شدت تحت تأثیر قرار دهند عبارتند از: اندازه شیرهای تخلیه، نرخ جریان هوای ورودی و خروجی به مخزن و اصطکاک در سیستم، که به صورت آزمایشگاهی بررسی شده و در مدل‌سازی رفتار این تجهیزات اعمال گردید. نتایج با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی که شامل همه روش‌های کنترلی میراگر و همچنین حالتی که از مخزن گاز تحت فشار برای افزایش ظرفیت نیروی مقاوم میراگر استفاده می‌شود، تایید گردید. نتایج مدل نهایی با حدود ۵٪ اختلاف نسبت به نتایج آزمایشگاهی غیرخطی نشان دهنده یک همبستگی خوب بین مشخصات دینامیکی غیرخطی اصلی مدل و میراگر آزمایش شده است.

۵-۲- مشکلات و کمبودهای تکنیکی تجهیزات باز تنظیم شونده فعلی

همان گونه که در تاریخچه تحقیقات مشاهده شد، مطالعات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های عددی متعدد انجام شده موید عملکرد امید بخش تجهیزات باز تنظیم شونده در کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها

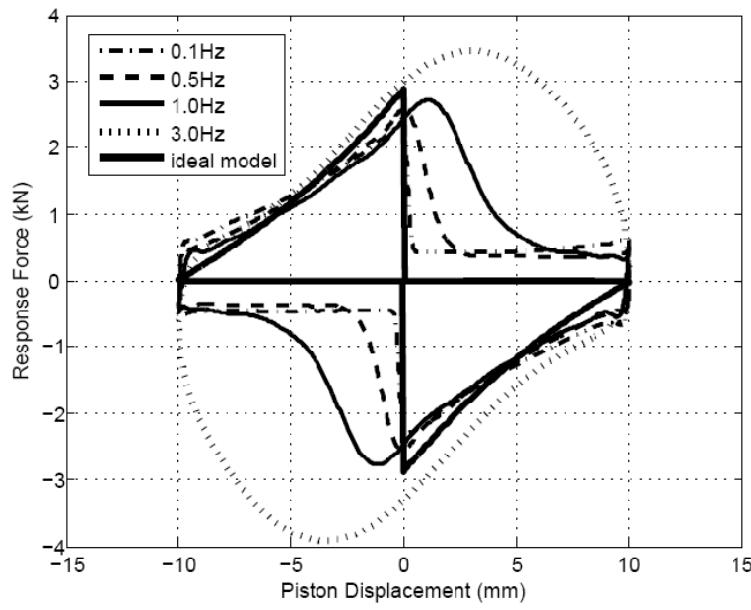
تحت انواع مختلف زمین‌لرزه‌ها است [۱۴، ۴۴، ۵۱-۴۸، ۵۳، ۵۴، ۶۹، ۷۲]. با این وجود، تجهیزات باز تنظیم شونده مطالعه شده دارای یک سری محدودیتها و کمبودها می‌باشند.

در رفتار ایده‌آل برای میراگر باز تنظیم شونده فرض بر آن است که در لحظه باز تنظیم شدن میراگر، اتلاف انرژی به صورت آنی صورت می‌پذیرد. همچنین فرض می‌شود که هنگامی که شیر کنترل باز است، نیروی مقاوم میراگر به صفر می‌رسد. به عبارت دیگر اتلاف آنی انرژی باعث می‌گردد که نیروی مقاوم میراگر بعد از باز شدن شیر کنترل بلافاصله به صفر برسد. علاوه بر این فرض می‌شود که رفتار میراگر در هر دو جهت متقارن باشد.

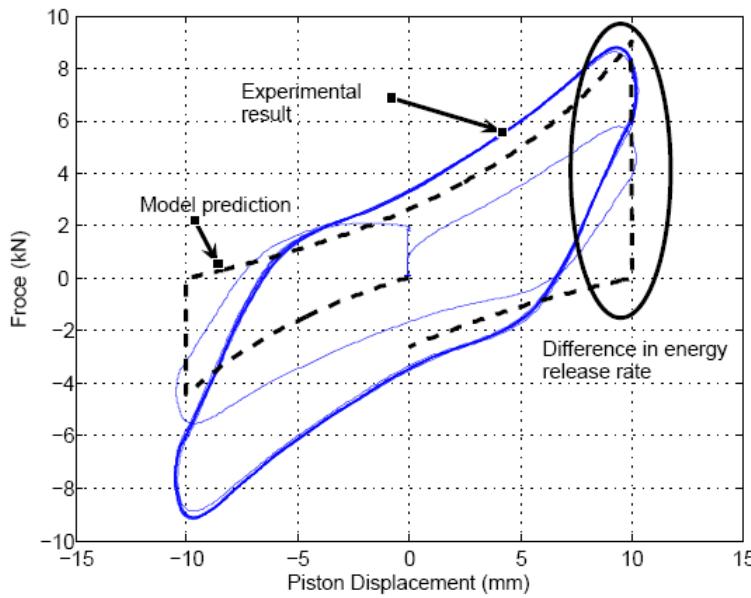
یک میراگر باز تنظیم شونده با ظرفیت نیرویی کوچک (حدود ۱۰۰ نیوتن) توسط جباری و بابرو مورد آزمایش قرار گرفت [۴۴]. میراگر آزمایش شده توانایی رهاسازی و اتلاف تمام انرژی ذخیره شده را به طور کاملاً آنی (نسبت به زمان تناوب سازه آزمایش شده) دارا می‌باشد. با این حال برای میراگری با ظرفیت نیرویی بزرگ‌تر، نرخ اتلاف انرژی بسیار مهم‌تر خواهد بود چرا که نرخ جریان^{۱۲۵} مورد نیاز برای رهاسازی و اتلاف مقادیر بزرگ انرژی ذخیره شده در میراگر به طور بالقوه بسیار بالا خواهد بود. بنابراین ممکن است زمان لازم برای اتلاف انرژی در مقایسه با زمان پاسخ سازه قابل توجه باشد که این امر باعث بروز مشکل در سیستم کنترلی می‌گردد.

نتایج تحقیقات انجام شده بر روی میراگر باز تنظیم شونده دو-محفظه‌ای که در آن از هوا به عنوان سیال کاربردی استفاده شده بود نشان می‌دهد که ظرفیت اتلاف انرژی این نوع میراگر در تحریکات با فرکانس بالا دارای برخی محدودیتها است [۶۸، ۷۱، ۷۳]. همان طوری که در شکل ۲-۲۲ مشاهده می‌شود برای فرکانس تحریک بالاتر از $1/0\text{ Hz}$ ، رفتار میراگر با مدل ایده‌آل بسیار فاصله دارد و میراگر نتوانسته کل انرژی ذخیره شده را در لحظه باز تنظیم شدن (هنگامی که تغییر مکان صفر است) به طور آنی مستهلک نماید. این اثر در فرکانس $3/0\text{ Hz}$ کاملاً مشهود است. علاوه بر این، برای میراگر با نیروی مقاوم بزرگ‌تر تلاش برای تخلیه هوا از شیرها به منظور اتلاف انرژی ذخیره شده، نیاز به زمان قابل ملاحظه‌ای (در مقایسه با تحریک اعمال شده به میراگر) در برخی موارد آزمایش شده دارد [۵۹، ۶۸، ۷۱، ۷۳]. این موضوع در شکل ۲-۲۳ کاملاً مشهود است.

^{۱۲۵} Flow rate



شکل ۲-۲۲- منحنی نیرو- تغییرمکان آزمایشگاهی و تحلیلی با استفاده از روش کنترلی ۴-۲ برای تحریک سینوسی با دامنه ۱۰ mm در فرکانس‌های ۰/۱، ۰/۵، ۱/۰ و ۳/۰ Hz [۷۳].

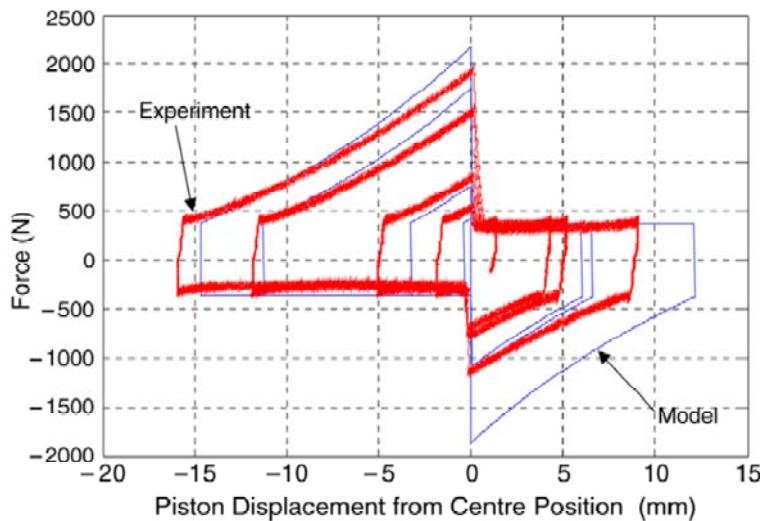


شکل ۲-۲۳- منحنی نیرو- تغییرمکان برای تحریک سینوسی با دامنه ۱۰ mm و فرکانس ۲/۰ Hz [۷۱].

علاوه بر مشکلات ذکر شده، به دلیل عدم قرارگیری پیستون در وسط طول سیلندر قبل از اعمال نیرو، میراگرهای تنظیم شونده فعلی رفتار غیر متقابن از خود نشان می‌دهند [۶۲، ۵۹، ۵۷].

[۷۳]. این موضوع حساسیت بالای این میراگرها به نحوه نصب میراگر در سازه و همچنین تغییرات موقعیت پیستون به دلیل انقباض یا انبساط عضو سازه‌ای متصل به میراگر را نشان می‌دهد که در کاربردهای عملی اجتناب ناپذیر هستند. این موضوع در شکل ۲-۲ به وضوح دیده می‌شود که در آن اندکی انحراف پیستون از مرکز قبل از اعمال نیرو به میراگر باعث بروز رفتار نامتقارن در میراگر شده است.

نکته دیگری که می‌توان به آن اشاره کرد محدودیت سختی و نیروی مقاوم در میراگر باز تنظیم شونده دو-محفظه‌ای است. به دلیل آن که در این نوع میراگر فشار اولیه هوای درون مخازن ثابت و معادل فشار اتمسفر است و از طرفی سختی میراگر با فشار مخازن مناسب است، لذا برای یک میراگر، سختی و در نتیجه نیروی مقاوم میراگر ثابت بوده و نمی‌توان آن را تغییر داد و یا تنظیم نمود [۷۳]. به طوری که برای دستیابی به نیروی مقاوم بزرگ‌تر نیاز به تغییر ابعاد میراگر (قطر و طول سیلندر) است. این امر نیازمند طراحی و ساخت میراگرهای مختلف با ابعاد پیستون و سیلندر متفاوت است. هرچند ایده استفاده از مخزن هوای فشرده و اتصال آن به مخازن میراگر دو-محفظه‌ای به منظور افزایش نیروی مقاوم میراگر و غلبه بر محدودیت اشاره شده توسط چن پیشنهاد شده است [۶۸]، اما این مساله باعث به وجود آمدن مشکلات دیگر و پیچیدگی میراگر می‌شود [۷۳].



شکل ۲-۲- منحنی نیرو- تغییرمکان برای تحریک سینوسی با فرکانس 0.1 Hz [۵۹].

فصل سوم

معرفی میراً گر ابداعی

۱-۳- مقدمه

در میراگرهای باز تنظیم شونده، اتلاف انرژی ذخیره شده معمولاً با جریان یافتن سیال عملکردی (گاز یا روغن) از میان یک شیر کنترل به دلیل اختلاف فشار بین دو مخزن میراگر صورت می‌پذیرد. شیر کنترل این قابلیت را دارد که میزان اتلاف انرژی را متناسب با انرژی ذخیره شده در میراگر تنظیم نماید. هدف اصلی در تجهیزات باز تنظیم شونده، اتلاف انرژی ذخیره شده در میراگر در کمترین زمان ممکن و جلوگیری از بازگشت این انرژی به سازه است. بنابراین مکانیزم اتلاف انرژی در این تجهیزات بسیار مهم و حیاتی است. اگر میراگرهای تنظیم شونده نتوانند انرژی ذخیره شده را قبل از بازگشت به سازه اتلاف نمایند آن‌گاه کارایی این میراگرهای به شدت کاهش می‌یابد.

در میراگر باز تنظیم شونده ابداعی از یک مکانیزم متفاوت برای اتلاف انرژی ذخیره شده در میراگر استفاده شده است. به علاوه، طراحی میراگر پیشنهادی به گونه‌ای است که مشکلات و کمبودهای تکنیکی موجود در میراگرهای باز تنظیم شونده فعلی که در بخش ۲-۵ به آن‌ها اشاره شد را برطرف می‌سازد. در این فصل میراگر ابداعی و اجزای تشکیل دهنده آن معرفی شده و مشخصات و ویژگی‌های آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس مدل رفتاری حاکم بر آن بررسی گردیده و در ادامه روش‌های مختلف کنترل میراگر ابداعی معرفی شده و مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در پایان ظرفیت اتلاف انرژی میراگر ابداعی با سایر میراگرهای مقایسه می‌شود.

۲-۳- معرفی میراگر MR-HSRD^{۱۲۶} ابداعی

میراگر ابداعی در واقع یک میراگر گازی-روغنی^{۱۲۷} است که در آن به طور همزمان از دو نوع سیال عملکردی استفاده شده است؛ گاز تحت فشار^{۱۲۸} و سیال مغناطیسی^{۱۲۹}. این میراگر شامل یک سیستم سیلندر-پیستون و یک شیر کنترل دو حالته باز-بسته^{۱۳۰} به همراه یک شیر مغناطیسی^{۱۳۱} است که بر

¹²⁶ Magneto rheological hydro-pneumatic semiactive resettable damper

¹²⁷ Hydro-pneumatic actuator

¹²⁸ Pressured gas

¹²⁹ MR-fluid

¹³⁰ On-off control valve

¹³¹ MR-valve

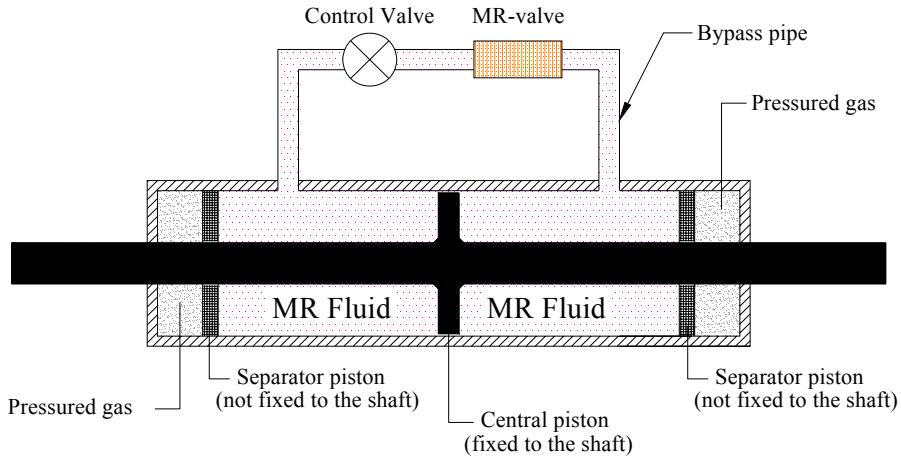
روی یک لوله کنار گذر^{۱۳۲} سوار شده‌اند و دو طرف سیلندر را به یکدیگر متصل می‌کنند. سیلندر محتوی گاز تحت فشار و سیال مغناطیسی است که توسط دو پیستون جداگانه متحرک از هم‌دیگر جدا شده‌اند. همچنان، سیال مغناطیسی موجود در سیلندر توسط یک پیستون مرکزی متصل به شفت، به دو قسمت تقسیم می‌گردد. در شکل ۳-۱ شماتیک میراگر ابداعی نشان داده شده‌اند. دو سیال به کار رفته در میراگر ابداعی هر یک نقشی متمایز ایفا می‌کنند. گاز تحت فشار نقش یک فنر را دارد که با تغییر فشار گاز و یا تغییر طول محفظه گاز، سختی میراگر تنظیم می‌شود. همان طوری که در فصل دوم ذکر گردید، سیال مغناطیسی یک ماده با قابلیت کنترل پذیری است که وقتی در معرض یک میدان مغناطیسی خارجی قرار می‌گیرد تغییرات شدیدی در مشخصات رئولوژیکی آن به وجود می‌آید. سیال مغناطیسی این قابلیت را دارد که وقتی در معرض یک میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد طی چند میلی ثانیه از یک مایع ویسکوز خطی که به آسانی جریان می‌یابد، به یک ماده شبه-جامد^{۱۳۳} با مقاومت جاری شدن قابل تنظیم تبدیل شود و به محض از بین رفتن میدان مغناطیسی در زمان کوتاهی به حالت اولیه برگردد. معمولاً این تغییر حالت در سیال مغناطیسی همراه با یک تغییر بزرگ در نیروی مقاوم تجهیزاتی است که در آن‌ها از سیال مغناطیسی استفاده شده است.

در میراگرهای تنظیم شونده موجود، هنگامی که مقدار انرژی ذخیره شده بزرگ است اتلاف انرژی ذخیره شده با محدودیت همراه است. در میراگر ابداعی به منظور دستیابی به حداکثر میزان اتلاف انرژی در هنگام باز تنظیم شدن میراگر، از سیال مغناطیسی استفاده شده است. هنگامی که میراگر تحریک می‌شود، انرژی ورودی در گاز تحت فشار ذخیره می‌شود. با باز تنظیم شدن میراگر که بوسیله باز کردن شیر کنترل در زمان مقتضی انجام می‌شود، انرژی پتانسیل ذخیره شده در گاز تحت فشار آزاد شده و پیستون جداساز بین گاز تحت فشار و سیال مغناطیسی، باعث رانده شدن سیال مغناطیسی به سمت شیر مغناطیسی می‌شود. این امر باعث می‌شود سیال مغناطیسی با رد شدن از درون شیر مغناطیسی و لوله کنار گذر به طرف دیگر سیلندر جریان پیدا کند. در این لحظه و به طور همزمان با باز تنظیم شدن میراگر، تنش برشی سیال مغناطیسی با تنظیم جریان الکتریکی در شیر مغناطیسی متناسب با مقدار نیروی مقاوم میراگر (که توسط یک سنسور نیرو اندازه‌گیری می‌شود)

¹³² Bypass

¹³³ Semi-solid

تنظیم می‌شود، به گونه‌ای که قسمت عمداتی از انرژی ذخیره شده به صورت حرارت در شیر مغناطیسی تلف می‌شود.



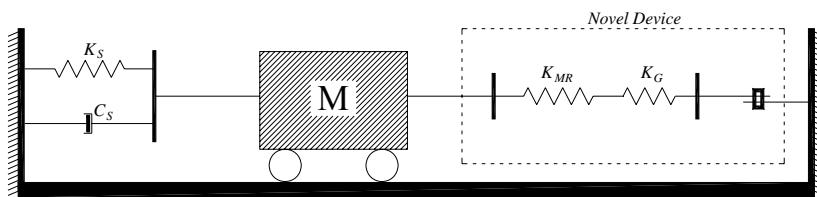
شکل ۳-۱- شماتیک میراگر ابداعی.

طراحی خاص به کار رفته در میراگر ابداعی باعث شده تا با تغییر مشخصات دینامیکی میراگر یک محدوده وسیع برای اعمال کنترل به میراگر فراهم شود. هوا می‌تواند به عنوان گاز عملکردی در این میراگر استفاده شود و فشار گاز را می‌توان به آسانی تنظیم نمود. سختی میراگر پیشنهادی با تغییر فشار گاز و یا تغییر طول محفظه گاز قابل تنظیم است. این تنظیم به صورت غیرفعال و قبل از اعمال تحریک خارجی به میراگر قابل انجام است. همچنین میرایی میراگر را می‌توان با تنظیم جریان الکتریکی شیر مغناطیسی تغییر داد که این عمل را می‌توان به صورت فعال و با استفاده از کنترلر انجام داد. علاوه بر این رفتار هیسترزیس میراگر را می‌توان با استفاده از فرمان‌های کنترلی مختلف که به شیر کنترل باز-بسته اعمال می‌شود، به صورت فعال تغییر داد. بنابراین سختی، میرایی و رفتار هیسترزیس میراگر ابداعی همگی قابلیت کنترل را دارند.

۳-۳- مدل رفتاری میراگر ابداعی

در این بخش به منظور توسعه یک مدل رفتاری برای میراگر ابداعی، رابطه نیرو-تغییرمکان میراگر وقتی که شیر کنترل بسته است را مورد بررسی قرار می‌دهیم. با توجه به شکل ۳-۱، هنگامی که شیر کنترل بسته است و پیستون به یک سمت سیلندر حرکت می‌کند، گاز و سیال مغناطیسی در یک طرف سیلندر در مقابل حرکت پیستون مقاومت کرده و فشرده می‌شوند. در واقع گاز و سیال

مغناطیسی همانند دو فنر که به صورت سری به یکدیگر متصل هستند، عمل می‌کنند. از این رو، برای به دست آوردن رابطه نیرو-تغییرمکان میراگر لازم است که هم اثر گاز تحت فشار و هم اثر سیال مغناطیسی در نظر گرفته شود. شماتیک مدل یک سیستم یک درجه آزادی به همراه میراگر ابداعی در شکل ۳-۲ نشان داده شده است که در آن K_s ، C_s و M به ترتیب معرف سختی، میرایی و جرم سیستم یک درجه آزاد است. K_G سختی گاز تحت فشار و K_{MR} سختی سیال مغناطیسی است که در ادامه معادلات حاکم بر آن‌ها بررسی می‌شوند.



شکل ۳-۲- شماتیک مدل یک سیستم یک درجه آزادی به همراه میراگر ابداعی.

ابتداً اثر گاز تحت فشار را بررسی می‌نماییم. با فرض استفاده از یک گاز ایده‌آل (مثلاً هوا) به عنوان گاز عملکردی و با در نظر گرفتن معادلات گاز ایده‌آل^{۱۳۴} در فرآیند دما ثابت^{۱۳۵} داریم:

$$p_G V_G^\gamma = c \quad (1-3)$$

که در آن γ ضریب گرمای ویژه^{۱۳۶} برای گازها (برای هوا $\gamma = 1/4$)، c یک عدد ثابت و p_G و V_G به ترتیب فشار و حجم گاز درون مخزن می‌باشند. با فرض این که فشار اولیه و حجم اولیه گاز درون مخازن دو طرف سیلندر با هم یکسان بوده و به ترتیب برابر با p_{0G} و V_{0G} باشند، نیروی مقاوم گاز تحت فشار تابعی از تغییرمکان پیستون (x) است که آن را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$F_G(x) = (p_{2G} - p_{1G})A = [(V_{0G} - Ax)^{-\gamma} - (V_{0G} + Ax)^{-\gamma}]Ac \quad (2-3)$$

که در آن A برابر با سطح مقطع موثر پیستون، p_{1G} و p_{2G} به ترتیب برابر با فشار مخزن ۱ و فشار مخزن ۲، بعد از جابجایی پیستون می‌باشند.

¹³⁴ Ideal gas

¹³⁵ Adiabatic process

¹³⁶ Ratio of specific heat

با بسط رابطه سمت راست معادله (۲-۳) و با خطی سازه و حذف جملات با مرتبه بالا، نیروی مقاوم تقریبی گاز تحت فشار از معادله زیر به دست می‌آید:

$$F_G(x) = \frac{2A^2\gamma p_{0G}}{V_{0G}} x \quad (3-3)$$

در واقع معادله (۳-۳) نشان دهنده یک رابطه خطی بین نیرو و تغییرمکان گاز تحت فشار است. سختی مؤثر گاز تحت فشار (K_G) را می‌توان از معادله زیر به دست آورد:

$$K_G = \frac{2A^2\gamma p_{0G}}{V_{0G}} \quad (4-3)$$

به منظور بررسی اثر سیال مغناطیسی و به دست آوردن سختی مؤثر آن، فرض می‌شود که سیال مغناطیسی یک مایع تراکم‌پذیر است که در این صورت نیروی مقاوم و سختی آن با مدول بالک^{۱۳۷} سیال مرتبط می‌شود. برای بسیاری از سیالات رابطه حجم-فشار یک رابطه خطی است و توسط یک ضریب تناسبی ثابت که مدول تراکم‌پذیری بالک (κ) نامیده می‌شود، توصیف می‌شود. با فرض فرآیند دما ثابت، رابطه بین تغییر فشار (Δp) و تغییر در حجم ویژه سیال مغناطیسی

($\Delta V / V_{0MR}$) متناسب با آن از معادله زیر به دست می‌آید:

$$\Delta p = -\kappa \frac{\Delta V}{V_{0MR}} \quad (5-3)$$

که در آن V_{0MR} حجم اولیه سیال مغناطیسی در مخزنی است که فشرده می‌شود. علامت منفی در معادله (۵-۳) به این دلیل است که یک تغییر مثبت در فشار (یک افزایش فشار) باعث یک تغییر منفی در حجم سیال می‌شود (یک کاهش حجم). از این رو با در نظر گرفتن تغییرات فشار در دو طرف پیستون مرکزی، نیروی مقاوم سیال مغناطیسی برابر است با:

$$F_{MR}(x) = 2\Delta p A \quad (6-3)$$

که در آن A سطح مقطع موثر پیستون است. با فرض یک تغییر منفی در حجم سیال مغناطیسی (ناشی از فشرده شدن سیال) و با جایگذاری معادله (۵-۳) در معادله (۶-۳):

¹³⁷ Bulk modulus

$$F_{MR}(x) = \frac{2\kappa A^2}{V_{0MR}} x \quad (7-3)$$

و سختی مؤثر سیال مغناطیسی برابر خواهد شد با:

$$K_{MR} = \frac{2\kappa A^2}{V_{0MR}} \quad (8-3)$$

همان طوری که در شکل ۳-۲ نشان داده شده است سیال مغناطیسی و گاز تحت فشار همانند دو فنر سری متصل بهم عمل می‌کنند. از این رو سختی کل میراگر (K_d) برابر است با:

$$K_d = \frac{K_G K_{MR}}{K_G + K_{MR}} \quad (9-3)$$

از آنجایی که در سیال مغناطیسی مدول تراکم پذیری بالک بسیار بزرگ است، لذا برای فشارهای گاز که به صورت عملی در میراگر به کار برد می‌شود، سختی سیال مغناطیسی بسیار بزرگ‌تر از سختی گاز تحت فشار است ($K_{MR} > K_G$). بنابراین سختی میراگر را می‌توان برابر با سختی گاز تحت فشار در نظر گرفت:

$$K_d \approx K_G \quad (10-3)$$

با در نظر گرفتن شکل ۳-۳ و با بازنویسی معادله (۴-۳) بر حسب ابعاد میراگر، مدل خطی سختی میراگر را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$K_{dLin} = K_G = \frac{2((\pi D^2/4) - A_s)^2 \gamma p_{0G}}{[(\pi D^2/4)L_{0G} + V_{con}]} \quad (11-3)$$

که در آن D قطر داخلی سیلندر، A_s سطح مقطع شفت، L_{0G} طول اولیه مخزن گاز تحت فشار و V_{con} حجم ثابت موجود در مخزن گاز تحت فشار است (به عنوان مثال حجم حجم اتصالات در سرسیلندر). معادله نیرو-تغییرمکان خطی میراگر بر حسب ابعاد میراگر برابر خواهد شد با:

$$F_d(x)_{Lin} = \frac{2((\pi D^2/4) - A_s)^2 \gamma p_{0G}}{[(\pi D^2/4)L_{0G} + V_{con}]} x \quad (12-3)$$

به منظور توسعه یک مدل ریاضی غیرخطی برای رفتار نیرو-تغییرمکان میراگر و دستیابی به یک مدل با دقت بالاتر، معادله (۲-۳) را مجدداً باز نویسی می‌کنیم:

$$F_G(x) = (p_{2G} - p_{1G})A = [(V_{0G} - Ax)^{-\gamma} - (V_{0G} + Ax)^{-\gamma}]Ac \quad (13-3)$$

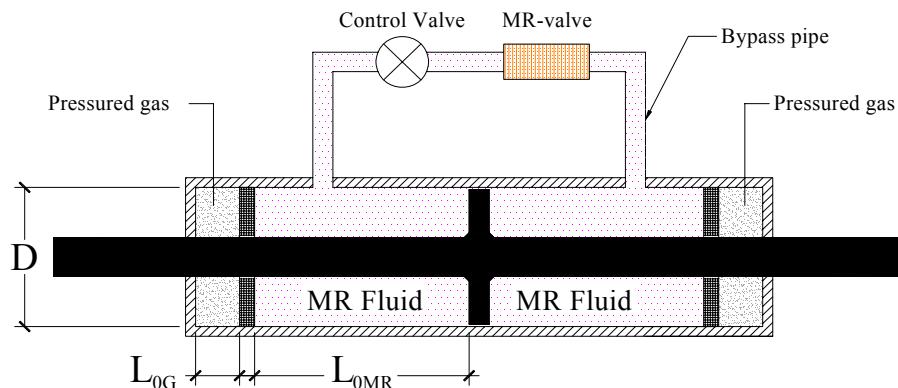
با بسط رابطه سمت راست معادله (۲-۳) و با حفظ جملات تا مرتبه سه و حذف جملات با مرتبه بالاتر، رابطه تقریبی نیرو-تغییرمکان غیرخطی میراگر از معادله زیر به دست می‌آید:

$$F_d(x)_{\text{Nonlin}} = \frac{2(\pi D^2/4 - A_s)^2 \gamma p_{0G} x}{[(\pi D^2/4)L_{0G} + V_{\text{con}}]} + \frac{(\pi D^2/4 - A_s)^4 (\gamma + 1)(\gamma + 2)p_{0G} x^3}{3[(\pi D^2/4)L_{0G} + V_{\text{con}}]^3} \quad (14-3)$$

مدل غیرخطی سختی میراگر را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$K_d_{\text{Nonlin}} = \frac{2(\pi D^2/4 - A_s)^2 \gamma p_{0G}}{[(\pi D^2/4)L_{0G} + V_{\text{con}}]} + \frac{(\pi D^2/4 - A_s)^4 (\gamma + 1)(\gamma + 2)p_{0G} x^2}{3[(\pi D^2/4)L_{0G} + V_{\text{con}}]^3} \quad (15-3)$$

بسته به میزان نسبت تغییرمکان پیستون به طول اولیه مخزن گاز تحت فشار (x/L_{0G})، از هر دو رابطه (۱۱-۳) و (۱۵-۳) می‌توان برای مدل‌سازی سختی میراگر استفاده کرد که در فصل چهارم به آن پرداخته می‌شود.



شکل ۳-۳- ابعاد هندسی میراگر ابداعی.

۴-۳- مکانیزم اتلاف انرژی در میراگر ابداعی

سیال مغناطیسی یکی از انواع مواد هوشمند است که مشخصات رئولوژیکی آن هنگامی که در معرض میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد متناسب با شدت میدان مغناطیسی تغییر می‌کند. مشخصه‌های رئولوژیکی یک ماده بازگو کننده پارامترهایی همچون الاستیسیته، پلاستیسیته و یا ویسکوزیته ماده است. در مورد سیال مغناطیسی، تنش برشی تسليم سیال (نقشه‌ای که پس از آن سیال آزادانه جریان

می‌یابد) می‌تواند از مقدار صفر (همانند یک سیال نیوتونی^{۱۳۸}) تا یک مقدار مشخص (همانند یک سیال غیر نیوتونی^{۱۳۹}) تغییر نماید. این تغییر در مشخصات رئولوژیکی سیال مغناطیسی به واسطه اعمال یک میدان مغناطیسی به سیال مغناطیسی رخ می‌دهد. این تغییر کامل برگشت‌پذیر بوده و تنها طی مدت چند میلی ثانیه اتفاق می‌افتد. سیال مغناطیسی شامل یک مایع حامل (که معمولاً آب و یا یکی از انواع روغن است) و ذرات مغناطیسی با سایز میکرونی می‌باشند که این ذرات در داخل مایع معلق هستند. ذرات مغناطیسی معمولاً حدود ۴۰-۲۰ درصد حجم سیال مغناطیسی را تشکیل می‌دهند [۷۴]. سیال‌های MR تجاری همچنین شامل بعضی از انواع مواد افزودنی به منظور جلوگیری از ته نشینی ذرات معلق در درون سیال می‌باشند. در غیاب میدان مغناطیسی، سیال مغناطیسی همانند یک سیال نیوتونی رفتار می‌کند و تحت تنش برشی اعمال شده همانند مایع حامل (آب، روغن، ...) جریان می‌یابد. در این حالت جریان سیال از معادله زیر تبعیت می‌کند:

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (16-3)$$

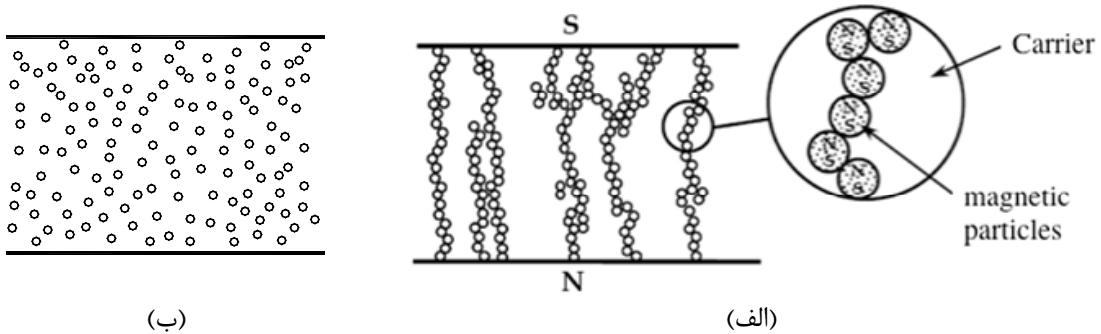
که در آن τ تنش برشی مایع حامل، η ویسکوزیته مایع حامل و $\dot{\gamma}$ نرخ تنش برشی اعمال شده به سیال است. این معادله مربوط به حالت خاموش^{۱۴۰} سیال مغناطیسی است که در آن هیچ‌گونه میدان مغناطیسی به سیال مغناطیسی اعمال نشده است. وقتی که میدان مغناطیسی به سیال مغناطیسی اعمال می‌شود (حالت روشن^{۱۴۱}) ذرات مغناطیسی معلق در سیال، در راستای خطوط میدان مغناطیسی اعمال شده ردیف می‌شوند. اندرکنش بین دوقطبی‌های به وجود آمده (ناشی از اعمال میدان مغناطیسی) باعث تشکیل یک ساختار زنجیره‌ای شکل موازی با خطوط میدان مغناطیسی می‌شود (شکل ۴-۳). این ساختار زنجیره‌ای در مقابل حرکت سیال مقاومت نموده و در نتیجه باعث افزایش مشخصات ویسکوز سیال شده و مقاومت سیال در برابر جاری شدن را به شدت افزایش می‌دهد. سیال تا هنگامی که تنش برشی اعمال شده به آن از مقدار حدی خود (تنش برشی تسليیم سیال) تجاوز ننماید، جریان نمی‌یابد اما به محض عبور تنش برشی از مقدار حدی، سیال مغناطیسی همانند یک سیال نیوتونی جاری می‌شود.

¹³⁸ Newtonian fluid

¹³⁹ Non-Newtonian fluid

¹⁴⁰ Off-state

¹⁴¹ On-state



شکل ۳-۴- نحوه قرارگیری دوقطبی‌های مغناطیسی در سیال مغناطیسی؛ (الف) حالت روشن (در حضور میدان مغناطیسی)، (ب) حالت خاموش (در غیاب میدان مغناطیسی).

تنش برشی تسلیم سیال مغناطیسی متناسب با افزایش میدان مغناطیسی اعمال شده افزایش یافته و در نتیجه باعث به وجود آمدن یک سیال با تنش برشی تسلیم وابسته به میدان مغناطیسی می‌گردد. تنش برشی تسلیم غیر صفر باعث می‌شود که سیال مغناطیسی یک رفتار غیر نیوتونی از خود نشان دهد. این رفتار را می‌توان با استفاده از معادله بینگهام^{۱۴۲} تشریح نمود:

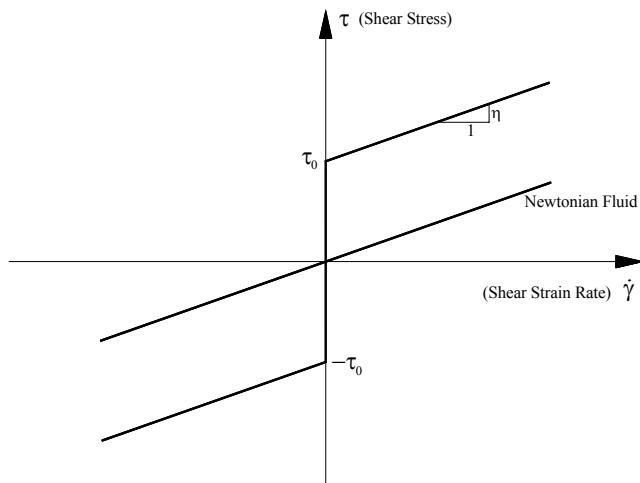
$$\tau = \tau_y(H) + \eta \dot{\gamma} \quad (17-3)$$

که در آن $(H)\tau$ تنش برشی تسلیم سیال است. در معادله (۱۶-۳) هنگامی که تنش برشی اعمال شده به سیال از تنش برشی تسلیم بزرگ‌تر شود، سیال جریان می‌یابد. در شکل ۳-۵ یک مدل پلاستیسیته بینگهام نشان داده شده است. با استفاده از این مدل می‌توان مشخصات سیال که تابع میدان مغناطیسی هستند را به خوبی بیان نمود. جدا از این که سیال مغناطیسی می‌تواند به سادگی در وضعیت روشن یا خاموش قرار بگیرد، این سیال توانایی این را دارد که تنش برشی تسلیم خود را در یک محدوده معین با تغییر شدت میدان مغناطیسی اعمال شده تغییر دهد. زمان پاسخ سیال مغناطیسی به تغییرات میدان مغناطیسی بسیار سریع بوده و در حدود چند میلی ثانیه است.

مطابق شکل ۳-۶ دو مود اصلی عملکردی برای سیال مغناطیسی وجود دارد و در تجهیزاتی که از سیال مغناطیسی در آن‌ها استفاده شده است، این سیال در یکی از این مودها رفتار می‌کند [۷۵].

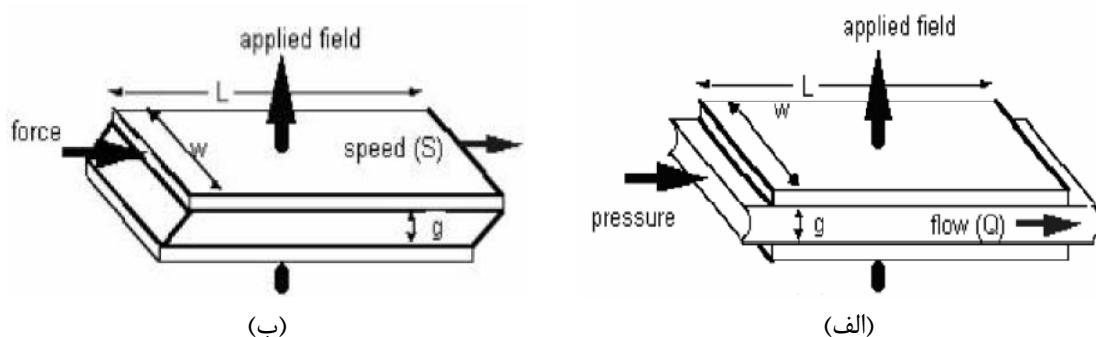
^{۱۴۲} Bingham's equation

در هر دو مود عملکردی، سیال مغناطیسی بین دو صفحه موازی هم که نقش قطب‌های مغناطیسی را ایفا می‌کنند قرار گرفته است. مود اول، مود جریان رانش فشاری^{۱۴۳} یا مود والو^{۱۴۴} نام دارد.



شکل ۳-۵- مدل پلاستیسیته بینگهام.

همان طوری که در شکل ۳-۶-الف مشاهده می‌شود، در این مود صفحات ثابت هستند و اختلاف فشار موجود در دو طرف، باعث رانده شدن سیال بین دو صفحه می‌شود. تجهیزاتی که در آن‌ها از مود جریان رانش فشاری استفاده می‌شود قادر به تولید نیروهای مقاوم بسیار بزرگ هستند اما طراحی و ساخت این گونه تجهیزات دشواری‌های خاص خود را دارد. شکل ۳-۶-ب مود برش مستقیم^{۱۴۵} را نشان می‌دهد که در آن صفحات نسبت به یکدیگر حرکت می‌کنند. این مود عملکردی معمولاً در میراگرهای MR استفاده می‌شود که نیروی تولید شده در آن‌ها معمولاً کوچک است.



شکل ۳-۶- مودهای عملکردی سیال مغناطیسی در برش؛ (الف) مود جریان رانش فشاری (مود والو)، (ب) مود برش مستقیم [۷۵].

¹⁴³ Pressure driven flow mode

¹⁴⁴ Valve mode

¹⁴⁵ Direct shear mode

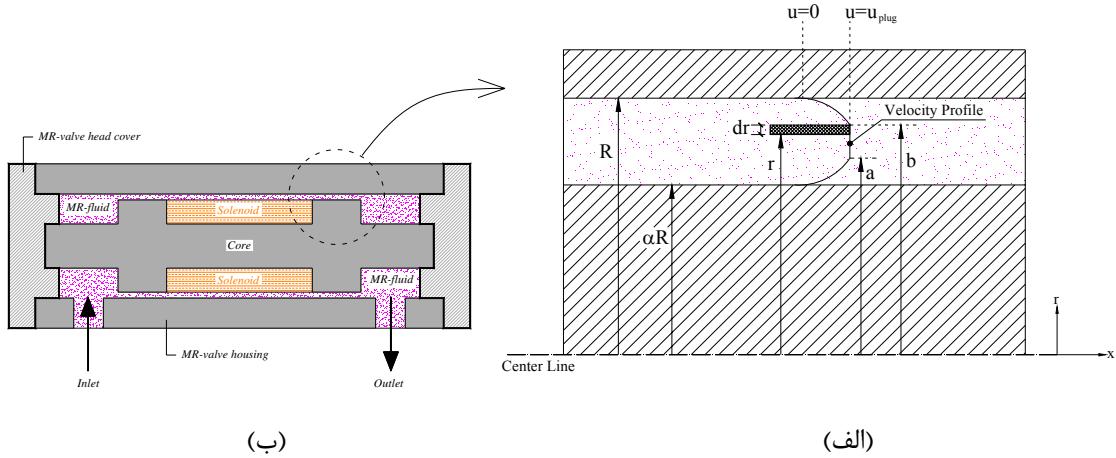
در میراگر ابداعی MR-HSRD (شکل ۳-۱)، شیر مغناطیسی نقش اتلاف کننده انرژی را ایفا می‌کند. در واقع بعد از باز تنظیم شدن MR-HSRD (با باز کردن شیر کنترل)، به دلیل اختلاف فشار موجود در دو طرف سیلندر، سیال مغناطیسی از یک سمت سیلندر با عبور از شیر مغناطیسی به طرف دیگر سیلندر رانده می‌شود. در این زمان میدان مغناطیسی مناسب (متناسب با اختلاف فشار موجود) از طریق شیر مغناطیسی به سیال مغناطیسی اعمال می‌شود تا باعث افزایش تنش برشی تسلیم سیال مغناطیسی شود. بنابراین قسمت اعظم انرژی ذخیره شده در میراگر، در حداقل زمان، به واسطه برش سیال مغناطیسی برانگیخته شده در شیر مغناطیسی، به صورت حرارت تلف می‌شود. تاکنون انواع مختلف از شیرهای مغناطیسی کنارگذر خارجی^{۱۴۶} طراحی و ساخته شده است و مشخصات آن‌ها توسط محققین مورد مطالعه قرار گرفته است [۸۶-۷۶].

در این قسمت، به منظور توسعه مدل رفتاری شیر مغناطیسی از مدل پلاستیسیته بینگهام استفاده می‌کنیم. فرض می‌شود که جریان سیال مغناطیسی در درون شیر مغناطیسی غیر تراکم‌پذیر باشد. در شکل ۳-۷ شماتیک شیر مغناطیسی به همراه پروفیل سرعت سیال بینگهام در شیار حلقوی شیر مغناطیسی نشان داده شده است. با توجه به تقارن محوری موجود در شیر مغناطیسی، دیاگرام و ابعاد هندسی به کار رفته در فرمولاسیون مدل رفتاری شیر مغناطیسی بر اساس تقارن محوری شیار حلقوی، در شکل ۳-۷ نشان داده شده است. هنگامی که سیال بینگهام در یک شیار حلقوی حرکت می‌کند، همان طوری که در شکل ۳-۷ نشان داده شده است، همواره یک بخش غیر برش خورده^{۱۴۷} در سیال وجود دارد که به صورت یک پلاگ صلب^{۱۴۸} حرکت می‌کند [۸۵، ۸۶]. سرعت در تمام ناحیه پلاگ ثابت بوده و برابر u_{plug} است و فرض می‌شود که اختلاف فشار موجود در امتداد شیار حلقوی (Δp)، برای غلبه بر تنش تسلیم سیال درون ناحیه پلاگ ناکافی است. ناحیه پلاگ در محدوده $a = b$ قرار گرفته است و مقادیر a و b نامعین می‌باشند. وجود جریان پلاگ ایجاب می‌کند که هرگونه تنش برشی وابسته به ویسکوزیته در درون ناحیه پلاگ و همچنین در مرزهای a و b باقیستی برابر صفر باشد.

¹⁴⁶ External bypass MR-valve

¹⁴⁷ Un-sheared

¹⁴⁸ Solid plug



شکل ۳-۷-(الف) پروفیل سرعت سیال بینگهایم در شیار حلقوی شیر مغناطیسی، (ب) شماتیک شیر مغناطیسی.

در شکل ۳-۷ نسبت شعاع داخلی به شعاع خارجی شیار حلقوی برابر α است و شعاع خارجی با R مشخص شده است. تنش برشی در سیال با نماد τ_{rx} نشان داده شده است و علامت کلیه بردارهای نیرو و سرعت در جهت جریان مثبت فرض شده است. با نوشتن تعادل نیروها در امتداد جریان برای یک المان سیلندری با ضخامت dr و طول L رابطه زیر به دست می‌آید:

$$d[-2\pi L \tau_{rx}] = \Delta p \times 2\pi r dr \quad (18-3)$$

علامت منفی در رابطه سمت چپ معادله (۱۷-۳) به دلیل در نظر گرفتن نیروی دیفرانسیلی است که برخلاف جهت جریان عمل می‌نماید. با انتگرال‌گیری از معادله (۱۷-۳) در محدوده $r=a$ و $r=\alpha R$ با مرتب کردن رابطه بر حسب τ_{rx} داریم:

$$\tau_{rx} = -\frac{\Delta p r}{2L} + \frac{A_1}{r} \quad \text{for } \alpha R \leq r \leq a \quad (19-3)$$

که در آن A_1 ثابت انتگرال‌گیری است. به طور مشابه برای محدوده $r=b$ و $r=R$ تنش برشی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\tau_{rx} = \frac{\Delta p r}{2L} + \frac{A_2}{r} \quad \text{for } b \leq r \leq R \quad (20-3)$$

که در آن A_2 ثابت انتگرال‌گیری است. نیروی برشی کل در دیوارهای شیار حلقوی برابر است با نیروی اعمال شده به سیال ناشی از اختلاف فشار کل (Δp) که بر تمام سطح مقطع سیال در درون شیار حلقوی اعمال می‌شود، بنابراین:

$$\Delta p\pi(R^2 - \alpha^2 R^2) = 2\pi\alpha RL[\tau_{rx}]_{r=\alpha R} + 2\pi RL[\tau_{rx}]_{r=R}$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta pR(1-\alpha^2)}{2L} = [\tau_{rx}]_{r=R} + [\tau_{rx}]_{r=R} \quad (21-3)$$

با جایگذاری مقادیر τ_{rx} از معادلات (۱۸-۳) و (۱۹-۳) در معادله (۲۰-۳) رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\Delta pR(1-\alpha^2)}{2L} = \alpha \left[-\frac{\Delta p\alpha R}{2L} + \frac{A_1}{\alpha R} \right] + \left[\frac{\Delta pR}{2L} + \frac{A_2}{R} \right] \Rightarrow 0 = \frac{1}{R}(A_1 + A_2) \quad (22-3)$$

یک جواب بدیهی (و دارای مفهوم فیزیکی) برای معادله (۲۱-۳)، $A_1 = -A_2$ است. برای ساده سازی معادله، A_1 با یک عدد ثابت برابر A -جایگزین می‌گردد. بنابراین:

$$A_1 = -A \quad \text{and} \quad A_2 = A \quad (23-3)$$

با جایگذاری مقادیر A_1 و A_2 از رابطه (۲۲-۳) در معادلات (۱۸-۳) و (۱۹-۳)

$$\begin{cases} \tau_{rx} = -\left(\frac{\Delta pr}{2L} + \frac{A}{r}\right) & \text{for } \alpha R \leq r \leq a \\ \tau_{rx} = \frac{\Delta pr}{2L} + \frac{A}{r} & \text{for } b \leq r \leq R \end{cases} \quad (24-3)$$

نیروی برشی کل که بر روی سطح حلقوی غیر برش خورده ناحیه پلاگ اعمال می‌شود برابر است با اختلاف فشار (Δp) ضربدر مساحت سطح مقطع ناحیه پلاگ:

$$\tau_y(2\pi al) + \tau_y(2\pi bl) = \Delta p\pi(b^2 - a^2) \Rightarrow b - a = \frac{2L\tau_y}{\Delta p} \quad (25-3)$$

با توجه به این که در معادله فوق، τ_y تنش تسلیم سیال است که بر سطح سیلندری ناحیه غیر برش خورده پلاگ عمل می‌کند، از معادله (۲۴-۳) می‌توان برای محاسبه حداقل اختلاف فشار مورد نیاز $a = \alpha R$ و $b = R$ برای شروع جریان سیال استفاده نمود. برای محاسبه Δp_{min} با قرار دادن R و حداقل اختلاف فشار مورد نیاز عبارتست از:

$$\Delta p_{min} = \frac{2L\tau_y}{R(1-\alpha)} \quad (26-3)$$

همان طوری که در معادله (۲۵-۳) مشاهده می‌شود، Δp_{min} وابسته به تنش تسلیم سیال مغناطیسی و ابعاد هندسی شیر مغناطیسی است. متعاقباً، تنش تسلیم سیال مغناطیسی، $(H_y)\tau$ ، خود تابع شدت

میدان مغناطیسی است. حداقل نیروی مورد نیاز برای شروع جریان سیال مغناطیسی در شیر مغناطیسی متصل به میراگر ابداعی MR-HSRD را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$F_{\min} = \frac{2L\tau_y}{R(1-\alpha)} A_p \quad (27-3)$$

که در آن A_p برابر سطح مقطع پیستون میراگر MR-HSRD است.

در واقع هنگامی که میراگر MR-HSRD تحریک می‌شود، نیروی مقاوم میراگر از طریق یک سنسور نیرو اندازه‌گیری می‌شود. در لحظه باز تنظیم شدن میراگر و هنگامی که نیروی مقاوم میراگر حداقل است، کنترلر به شیر کنترل فرمان باز شدن می‌دهد و اجازه می‌دهد که سیال مغناطیسی از میان شیر مغناطیسی عبور نماید. به طور همزمان، کنترلر تنش تسلیم مورد نیاز سیال مغناطیسی را متناسب با نیروی مقاوم اندازه‌گیری شده در میراگر با استفاده از معادله (۲۶-۳) حساب می‌کند. سپس با تغییر میدان مغناطیسی در شیر مغناطیسی تنش تسلیم به طور پیوسته به میزان حدی خود تنظیم می‌شود تا این که قسمت اعظم انرژی ذخیره شده در میراگر MR-HSRD تلف شده و نیروی مقاوم میراگر به صفر برسد. پس از آن، میدان مغناطیسی اعمال شده به شیر مغناطیسی صفر شده (سیال مغناطیسی در حالت خاموش جریان می‌یابد) و میراگر برای باز تنظیم شدن بعدی منتظر می‌ماند. تمام فرایند فوق تنها در چند میلی ثانیه اتفاق می‌افتد.

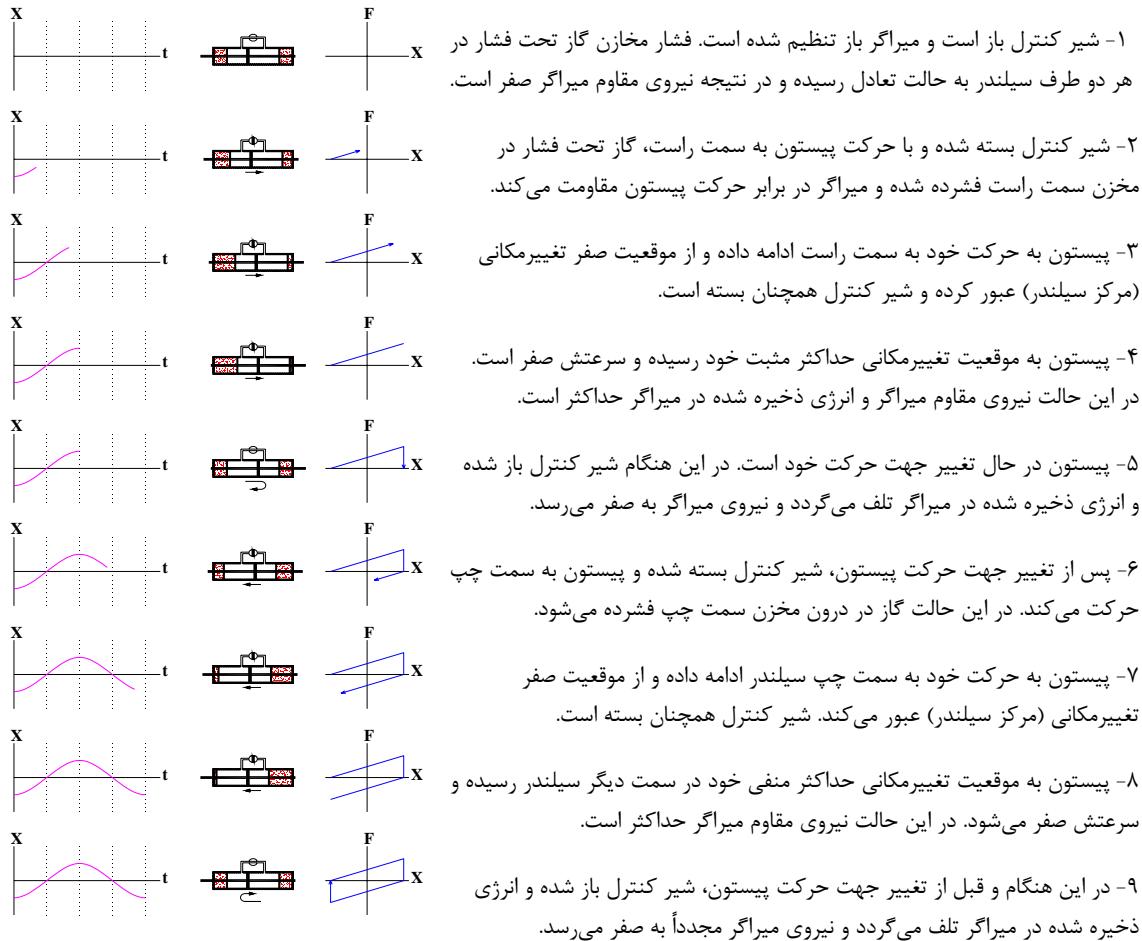
۳-۵- دیدگاه‌های کنترلی میراگر ابداعی

یکی از ویژگی‌های خاص میراگرهای باز تنظیم شونده قابلیت تغییر رفتار هیسترزیس سازه متناسب با نیاز طراحی و یا نیاز کنترلی است. این امر را می‌توان با انتخاب لحظه باز و بسته شدن شیر کنترل و طول مدت زمان باز یا بسته بودن آن انجام داد. به طور کلی در یک تحریک اعمال شده به میراگر، متناسب با استراتژی کنترل، عملأً موقعیت‌های محدودی وجود دارد که در آن‌ها می‌توان شیر کنترل را باز نمود و میراگر را باز تنظیم^{۱۴۹} کرد. معمولاً این لحظه هنگامی است که انرژی ذخیره شده در میراگر حداقل است و جهت حرکت پیستون تغییر می‌کند و یا پیستون از موقعیت تغییرمکانی اولیه که مبدأ آغاز حرکت پیستون پس از آخرین باز تنظیم شدن است، عبور می‌کند. فرمائینی که برای باز و

¹⁴⁹ Reset

بسته کردن شیر کنترل اعمال می‌گردند و همچنین زمان‌بندی این فرامین می‌تواند امکان تنظیم رفتار هیسترزیس میراگر را به وجود بیاورد. در این بخش روش‌های کنترلی برای تنظیم رفتار هیسترزیس میراگر ابداعی ارایه می‌شود.

به طور کلی دو دیدگاه کنترلی برای میراگرهای باز تنظیم شونده وجود دارد که شامل دیدگاه کنترل باز تنظیمی و دیدگاه کنترل قطع و وصل است. این دیدگاه‌ها بر اساس زمان‌بندی فرامین شیر کنترل استوار هستند. در دیدگاه کنترلی اول که کنترل باز تنظیمی نامیده می‌شود، وقتی که تغییرمکان پیستون حداکثر است، شیر کنترل بسته شده و میراگر در برابر تغییرمکان پیستون مقاومت می‌نماید. شیر کنترل تا زمانی که پیستون به وضعیت تغییرمکانی حداکثر خود در جهت دیگر برسد بسته می‌ماند و انرژی جنبشی پیستون در گاز تحت فشار ذخیره می‌شود. وقتی که پیستون به تغییرمکان حداکثر رسید (در این لحظه سرعت پیستون صفر است و انرژی ذخیره شده در میراگر حداکثر است) و قبل از تغییر جهت حرکت پیستون، شیر کنترل میراگر در یک لحظه زمانی کوتاه باز و بسته می‌شود (باز تنظیم می‌شود). با این عمل انرژی پتانسیل ذخیره شده در گاز تحت فشار باعث راندن سیال مغناطیسی به طرف دیگر سیلندر می‌شود که در نتیجه عبور سیال مغناطیسی از درون شیر مغناطیسی و با اعمال جریان الکتریکی مناسب به شیر مغناطیسی، این انرژی به صورت حرارت تلف می‌شود. در شکل ۳-۸ روش کنترل باز تنظیمی برای یک تحریک کسینوسی اعمال شده به میراگر با رفتار خطی نشان داده شده است. همان طوری که در شکل مشاهده می‌شود، هنگامی که از روش کنترلی باز تنظیمی استفاده می‌شود، تمام انرژی ذخیره شده در میراگر در نقاط حداکثر تغییرمکان پیستون اتلاف می‌شود. از آنجایی که سطح زیر نمودار نیرو-تغییرمکان معرف انرژی تلف شده است لذا، روش کنترلی باز تنظیمی باعث اتلاف انرژی در هر چهار ربع منحنی نیرو-تغییرمکان و ایجاد نیرو و میرایی اضافی در هر چهار ربع منحنی نیرو-تغییرمکان می‌شود.



شکل ۳-۸- روش کنترل باز تنظیمی برای یک تحریک کسینوسی اعمال شده به میراگر ابداعی.

دیدگاه کنترل قطع و وصل شامل دو روش است، روش کنترل قطع و وصل نوع ۱ و نوع ۲. در روش کنترل قطع و وصل نوع ۱ همان طوری که در شکل ۳-۹ نشان داده شده است، در لحظه شروع حرکت، وقتی که پیستون از موقعیت تغییر مکانی صفر شروع به حرکت می کند، شیر کنترل بسته است و میراگر در برابر تغییرمکان پیستون مقاومت می کند. هنگامی که تغییرمکان پیستون به مقدار حداقل خود رسید و قبل از تغییر جهت حرکت پیستون، شیر کنترل باز می شود. با باز شدن شیر کنترل، انرژی ذخیره شده در گاز تحت فشار باعث راندن سیال مغناطیسی به طرف دیگر سیلندر می شود و در نتیجه باعث اتلاف انرژی می شود. شیر کنترل تا هنگامی که پیستون به موقعیت اولیه خود یا همان تغییرمکان صفر برسد، به صورت باز باقی می ماند و در برابر تغییرمکان پیستون مقاومت نمی کند. وقتی که پیستون به موقعیت اولیه خود می رسد (در این هنگام سرعت پیستون حداقل است)، شیر کنترل بسته شده و میراگر در برابر حرکت پیستون مقاومت می نماید تا این که مجدداً پیستون به تغییرمکان حداقل برسد (در این لحظه سرعت پیستون صفر است) و دوباره شیر کنترل باز

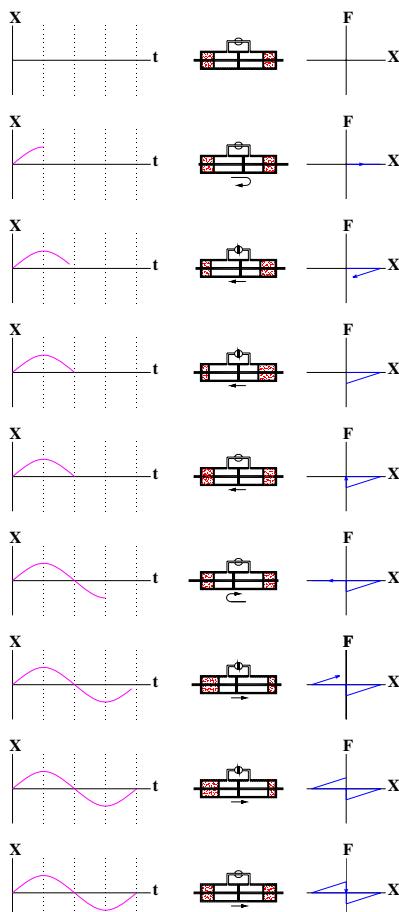
شده و این سیکل ادامه می‌یابد. در واقع در این روش کنترلی، در یک سیکل رفت و برگشت، میراگر فقط در برابر نیمی از حرکات پیستون مقاومت می‌کند و این هنگامی است که پیستون از موقعیت صفر اولیه دور می‌شود و انرژی ذخیره شده در میراگر در نقاط حداکثر تغییرمکان پیستون اتلاف می‌شود. با توجه به این که در روش کنترل قطع و وصل نوع ۱ اتلاف انرژی فقط در ربع‌های ۱ و ۳ منحنی نیرو-تغییرمکان صورت می‌پذیرد، لذا میزان اتلاف انرژی در این حالت یک چهارم روش کنترل باز تنظیمی است. با این حال نیروی مقاوم میراگر نصف روش کنترل باز تنظیمی است.



شکل ۳-۹- روش کنترل قطع و وصل نوع ۱ برای یک تحریک سینوسی اعمال شده به میراگر ابداعی

در روش کنترل قطع و وصل نوع ۲ همان طوری که در شکل ۳-۱۰ نشان داده شده است، در لحظه شروع حرکت شیر کنترل باز است و میراگر در برابر تغییرمکان پیستون مقاومت نمی‌کند و تا هنگامی که پیستون به تغییرمکان حداکثر برسد، شیر کنترل به صورت باز باقی می‌ماند. وقتی که تغییرمکان پیستون به مقدار حداکثر خود رسید و پیستون تغییر جهت داد، شیر کنترل بسته می‌شود و میراگر در برابر تغییرمکان پیستون مقاومت می‌کند تا این که پیستون به موقعیت اولیه خود یا همان

تغییر مکان صفر برسد. در این لحظه شیر کنترل باز شده و انرژی ذخیره شده در گاز تحت فشار باعث راندن سیال مغناطیسی به طرف دیگر سیلندر می‌شود و در نتیجه باعث اتلاف انرژی می‌گردد. شیر کنترل تا هنگامی که پیستون به موقعیت حداکثر خود یا همان سرعت حداکثر برسد، به صورت باز باقی می‌ماند و در برابر تغییر مکان پیستون مقاومت نمی‌کند. وقتی که پیستون به موقعیت حداکثر خود رسید (در این هنگام سرعت پیستون صفر است)، شیر کنترل بسته شده و میراگر در برابر حرکت پیستون مقاومت می‌نماید تا این که مجدداً پیستون به تغییر مکان صفر برسد و دوباره شیر کنترل باز شده و این سیکل ادامه می‌باید. در این روش کنترلی نیز میراگر فقط در برابر نیمی از حرکات پیستون مقاومت می‌کند و این هنگامی است که پیستون به سمت موقعیت صفر اولیه حرکت می‌کند. در این روش، اتلاف انرژی در نقاط صفر تغییر مکان پیستون اتلاف می‌شود. در روش کنترل قطع و وصل نوع ۲، اتلاف انرژی فقط در ربع های ۲ و ۴ منحنی نیرو-تغییر مکان صورت می‌گیرد و میزان اتلاف انرژی یک چهارم روش کنترل باز تنظیمی است.



- ۱- پیستون در موقعیت تغییر مکانی صفر قرار دارد و شیر کنترل باز است. فشار دو طرف سیلندر در حالت تعادل است و نیروی مقاوم میراگر صفر است.
- ۲- در حالی که شیر کنترل باز است پیستون به سمت راست حرکت می‌کند تا این که به موقعیت تغییر مکانی حداکثر برسد. نیروی مقاوم میراگر همچنان صفر است.
- ۳- پیستون به موقعیت تغییر مکانی حداکثر مثبت خود رسیده و سرعتش صفر شده است. در این حالت شیر کنترل بسته شده و پیستون تغییر جهت داده و به سمت چپ حرکت می‌کند و میراگر در برابر حرکت پیستون مقاومت می‌کند.
- ۴- پیستون به موقعیت تغییر مکانی صفر رسیده و سرعتش حداکثر است. در این هنگام نیروی مقاوم میراگر و انرژی ذخیره شده در میراگر حداکثر است.
- ۵- در این هنگام شیر کنترل باز شده و انرژی ذخیره شده در میراگر تلف می‌شود و نیروی میراگر به صفر می‌رسد.
- ۶- پس از عبور پیستون از موقعیت تغییر مکانی صفر، شیر کنترل کماکان باز باقی می‌ماند تا این که پیستون به موقعیت تغییر مکانی حداکثر منفی برسد و تغییر جهت بدهد. در این هنگام سرعت پیستون صفر است.
- ۷- پس از تغییر جهت حرکت پیستون، شیر کنترل بسته شده و پیستون به سمت چپ حرکت کرده و میراگر در برابر حرکت پیستون مقاومت می‌کند.
- ۸- پیستون به موقعیت تغییر مکانی صفر می‌رسد و سرعتش حداکثر می‌شود. در این هنگام نیروی مقاوم میراگر حداکثر است.
- ۹- در این هنگام شیر کنترل باز شده و انرژی ذخیره شده در میراگر تلف شده و نیروی میراگر مجدداً به صفر می‌رسد.

شکل ۳-۱۰- روش کنترل قطع و وصل نوع ۲ برای یک تحریک سینوسی اعمال شده به میراگر ابداعی.

۳-۶-۳- ویژگی‌های منحصر بفرد میراگر ابداعی

۳-۶-۱- تنظیم نیروی مقاوم میراگر متناسب با نیاز طراحی بدون نیاز به تعویض میراگر

از آنجایی که مدل‌های رفتاری میراگر (معادلات (۱۲-۳) و (۱۴-۳)) شامل پارامترهای هندسی میراگر (مثل قطر پیستون و طول مخزن گاز تحت فشار) هستند، لذا می‌توان از این پارامترها برای طراحی ابعادی اولیه میراگر متناسب با نیروی مورد نیاز برای کنترل سازه استفاده نمود. این یکی از مشخصات ویژه میراگر ابداعی است که میراگرهای باز تنظیم شونده قبلی فاقد آن می‌باشند. یکی از پارامترهایی که در نیروی مقاوم میراگر موثر است و به آسانی قابل تغییر است، فشار اولیه گاز تحت فشار (p_{0G}) می‌باشد. لذا در صورت نیاز و متناسب با نیاز طراحی (که ممکن است به دلیل تغییرات در مشخصات سازه‌ای و یا سایر عوامل به وجود آید) می‌توان نیروی مقاوم میراگر را با تغییر فشار اولیه گاز به سادگی در یک محدوده وسیع تنظیم نمود بدون آن که نیازی به تعویض میراگر باشد. این ویژگی میراگر ابداعی خصوصاً برای مقاصد مقاوم سازی و یا تنظیم مجدد مشخصات میراگر پس از بروز یک آسیب سازه‌ای که ممکن است هنگام وقوع زلزله و یا بارهای محیطی دیگر اتفاق بیافتد، بسیار مفید و کاربردی است.

۳-۶-۲- تنظیم کورس پیستون متناسب با نیاز طراحی بدون نیاز به تعویض میراگر

طراحی خاص میراگر ابداعی این امکان را فراهم می‌سازد که برای یک میراگر ساخته شده، بتوان حداکثر کورس پیستون را متناسب با نیاز طراحی و بر اساس حداکثر تغییرمکان پیش‌بینی شده در سازه تنظیم نمود. این کار را می‌توان پس از ساخت میراگر و در هنگام پر کردن میراگر با گاز تحت فشار و سیال مغناطیسی، با تنظیم طول مخزن گاز تحت فشار (L_{0G}) و در نتیجه با تغییر حجم اولیه سیال مغناطیسی (V_{0MR}) که به داخل سیلندر پمپ می‌شود، تنظیم نمود. بدیهی است که با انجام این عمل دیگر نیازی به ساخت میراگرهای متفاوت با کورس‌های پیستون مختلف نمی‌باشد و با یک تغییر ساده در طول مخزن گاز تحت فشار و همچنین حجم اولیه سیال مغناطیسی می‌توان یک میراگر را برای کاربردهای متفاوت، متناسب با نیاز تغییرمکانی سازه استفاده نمود. این امر باعث کاهش

هزینه‌های تولید میراگر می‌شود و همچنین این امکان را فراهم می‌سازد که در صورت تغییر پارامترهای سازه‌ای، مشخصات میراگر متناسب با این تغییرات، در محل تنظیم شود.

۳-۶-۳- عدم حساسیت میراگر به نحوه نصب در سازه

یکی دیگر از مزایای استفاده از پیستون متحرک بین مخزن گاز تحت فشار و سیال مغناطیسی در میراگر ابداعی، عدم حساسیت این میراگر به نحوه نصب در سازه و همچنین تغییرات موقعیت پیستون میانی به دلیل انقباض یا انبساط عضو سازه‌ای متصل به میراگر است. همان طوری که در بخش ۲-۵ بدان اشاره شد، عدم تنظیم موقعیت پیستون میانی در مرکز سیلندر در انواع دیگر میراگرهای باز تنظیم شونده باعث بروز رفتار نامتقارن می‌شود. در میراگر ابداعی فشار و حجم مخازن گاز تحت فشار در دو طرف سیلندر برابر است و سیال مغناطیسی نقش زیادی در سختی میراگر ندارد. در هنگام نصب میراگر در سازه در صورتی که شیر کنترل باز باشد، اگر پیستون میانی مقداری از مرکز سیلندر منحرف شود سیال مغناطیسی می‌تواند به آسانی از طریق لوله کنار گذر از یک طرف سیلندر به طرف دیگر حرکت کند و در نتیجه حرکت پیستون تاثیری بر گاز تحت فشار نخواهد گذاشت. بنابراین، پس از نصب کامل میراگر در سازه و با بستن شیر کنترل عملًا سختی میراگر در هر دو طرف یکسان بوده و میراگر یک رفتار متقاضی از خود نشان می‌دهد.

۴-۶-۳- عدم نیاز به انباشتگر^{۱۵۰}

یکی از مزیت‌های میراگر ابداعی نسبت به سایر انواع میراگرهای دیگر است. دلیل این امر طراحی هندسی خاص میراگر ابداعی است که به واسطه وجود یک پیستون متحرک بین مخزن گاز تحت فشار و مخزن سیال مغناطیسی در هر دو طرف سیلندر حاصل شده است. در واقع هر یک از مخازن گاز تحت فشار علاوه بر این که نقش فنر را در میراگر ایفا می‌کنند، این توانایی را نیز دارند که در صورت انبساط حرارتی سیال مغناطیسی به عنوان انباشتگر نیز عمل نمایند و مانع از انفجار میراگر به واسطه افزایش حجم سیال مغناطیسی شوند.

¹⁵⁰ Accumulator

۳-۵-۶- امکان کنترل نامتمرکز^{۱۵۱} میراگر

یکی از مزایای کنترل نامتمرکز عدم وابستگی نیروی کنترلی میراگر به پاسخ کل سازه است. با توجه به این که نیروی مقاوم میراگر ابداعی فقط متناسب با تغییر مکان و سرعت نسبی دو سر میراگر است، لذا غیر وابسته به پاسخ سایر نقاط سازه است، به طوری که می‌توان میراگر را بدون دانستن وضعیت کل سازه و تنها با اندازه گیری‌های محلی^{۱۵۲} در محل نصب میراگر کنترل نمود. از آنجایی که تغییر مشخصات جرم و سختی سازه صراحتاً تاثیری بر روش‌های کنترلی میراگر ندارند بنابراین کنترل میراگر نسبت به عدم اطمینان‌های^{۱۵۳} به وجود آمده در مشخصات سازه، خطاهای محتمل در مدل‌سازی جرم و سختی سازه و همچنین بروز برخی پدیده‌های غیرخطی که ممکن است در هنگام اعمال بار دینامیکی به سازه به وجود آید، پایدار و مقاوم^{۱۵۴} است. مزیت دیگر کنترل نامتمرکز عدم نیاز به سیستم کنترلی متتمرکز و حذف سیم‌های متصل کننده سنسورها و محرک‌ها به سیستم کنترل مرکزی است به طوری که هر میراگر را می‌توان با استفاده از سنسور و کنترلر نصب شده بر روی خود میراگر کنترل نمود. این امر در سازه‌های بزرگ که تعداد سنسورها و محرک‌ها زیاد است، بسیار سودمند است.

۳-۶-۶- امکان دستکاری نمودن رفتار هیسترزیس میراگر

همان طوری که در بخش ۳-۵ نشان داده شد، میراگرهای تنظیم شونده این امکان را دارند که متناسب با روش کنترلی به کار گرفته شده در آنها، رفتار هیسترزیس متفاوتی از خود نشان دهند. توانایی دستکاری نمودن رفتار هیسترزیس میراگر ابداعی از طریق اعمال روش‌های کنترلی متفاوت، این امکان را فراهم می‌سازد که در مقایسه با سایر تجهیزات نیمه‌فعال و غیرفعال، میراگر ابداعی را بتوان برای طیف وسیع‌تری از سازه‌ها که در شرایط عملکردی متفاوت قرار گرفته‌اند، استفاده نمود. به عنوان مثال روش کنترل قطع و وصل نوع ۲ را می‌توان برای مقاوم‌سازی سازه‌هایی که فونداسیون آن‌ها توانایی تحمل نیروهای برشی بزرگ را ندارند استفاده نمود. زیرا در این روش کنترلی با توجه به

¹⁵¹ Decentralized control

¹⁵² Local measurement

¹⁵³ Uncertainty

¹⁵⁴ Robust

این که میراگر در ریع‌های دوم و چهارم در برابر تغییر مکان سازه مقاومت می‌نماید، لذا باعث افزایش نیروی برشی سازه نمی‌گردد.

۳-۶-۷- رفتار ایمن از خرابی در صورت بروز مشکل در میراگر

مزیت دیگر میراگر ابداعی خرابی امن^{۱۵۵} بودن آن است. با توجه به این که شیر کنترل میراگر در حالت نرمال بسته است، چنان چه مشکلی در عملکرد آن به وجود آید، میراگر مشابه یک فنر عمل می‌کند و باعث افزایش سختی سازه می‌شود. در صورتی که عملکرد شیر مغناطیسی با مشکل مواجه شود ولی شیر کنترل درست کار کند، آن‌گاه میراگر ابداعی مانند یک میراگر ویسکوز غیرفعال عمل می‌نماید و میرایی سیستم سازه‌ای را افزایش می‌دهد.

۳-۷- ظرفیت اتلاف انرژی میراگر ابداعی

به منظور ارزیابی ظرفیت اتلاف انرژی و میزان میرایی اضافی فراهم شده توسط میراگر ابداعی و همچنین مقایسه آن با سایر میراگرهای در این بخش به بررسی این موضوع می‌پردازیم. بدین منظور یک میراگر که رفتار آن شبیه مدل ماکسول خطی^{۱۵۶} است را در نظر می‌گیریم. حداکثر میزان اتلاف انرژی در یک میراگر ماکسول خطی که تحت تأثیر یک حرکت هارمونیک به صورت $x = \delta \sin(\omega t)$ قرار گرفته است، هنگامی حاصل می‌شود که ضریب میرایی میراگر $C = K/\omega$ شود [۵۲]. در این حالت حداکثر مقدار انرژی تلف شده در هر سیکل تغییر مکان برابر است با [۸۷]:

$$E_{D_{Max}} = \frac{\pi}{2} K \delta^2 \quad (28-3)$$

که در آن K سختی میراگر ویسکوز خطی و δ حداکثر دامنه جابجایی است.

انرژی اتلاف شده در میراگر ابداعی بستگی به روش کنترلی به کار رفته در میراگر دارد. برای یک میراگر با فرض رفتار خطی با سختی K و حداکثر دامنه جابجایی δ ، در صورتی که روش کنترل باز

¹⁵⁵ Fail safe

¹⁵⁶ Linear Maxwell

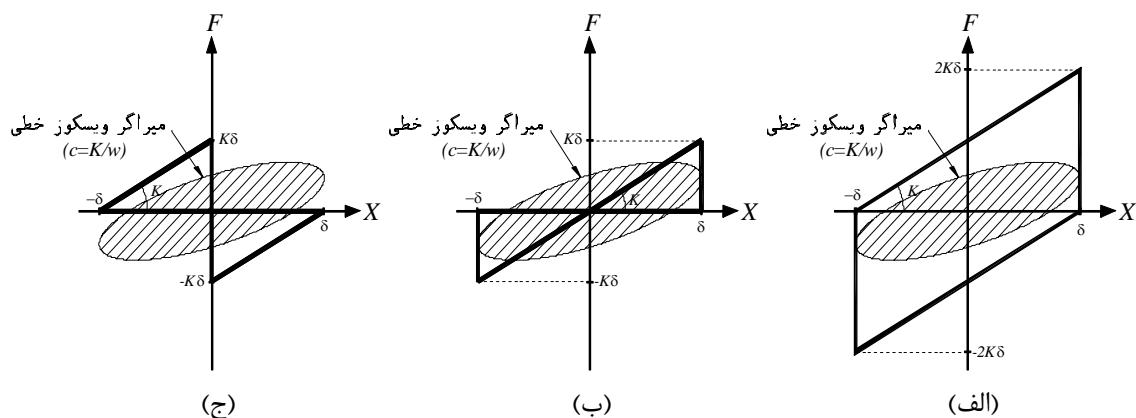
تنظیمی به کار برد شود، مطابق شکل ۳-۱۱-الف انرژی تلف شده در هر سیکل تغییرمکان هارمونیک سینوسی $x = \delta \sin(\omega t)$ برابر است با:

$$E_{D_{\text{resisting}}} = 4K\delta^2 \quad (29-3)$$

برای روش کنترل قطع و وصل نوع ۱ و ۲ مطابق شکل ۳-۱۱-ب و شکل ۳-۱۱-ج، انرژی تلف شده در هر سیکل تغییرمکان از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$E_{D_{\text{switching}}} = K\delta^2 \quad (30-3)$$

با مقایسه معادله (۲۸-۳) با (۲۹-۳) مشاهده می‌شود که در صورت استفاده از روش کنترل باز تنظیمی، انرژی تلف شده در میراگر ابداعی حدود ۲/۵ برابر بیشتر از حداکثر انرژی تلف شده در یک میراگر ماسکول خطی است. همچنین از مقایسه معادله (۲۸-۳) با (۳۰-۳) این گونه استنباط می‌شود که در صورت استفاده از روش کنترل قطع و وصل، انرژی تلف شده در میراگر ابداعی در حدود ۶۳٪ حداکثر انرژی تلف شده در یک میراگر ماسکول خطی است.



شکل ۳-۱۱- منحنی مقایسه‌ای نیرو-تغییرمکان برای میراگر ماسکول خطی غیرفعال و میراگر ابداعی؛ (الف) روش کنترل باز تنظیمی، (ب) روش کنترل قطع و وصل نوع ۱، (ج) روش کنترل قطع و وصل نوع ۲.

۳-۸-۳- اثر تغییرات حرارتی محیط بر روی میراگر ابداعی

تغییرات دمایی به وجود آمده در میراگر هم بر گاز تحت فشار و هم بر سیال مغناطیسی تأثیر می‌گذارد و باعث تغییر حجم این دو سیال می‌شود. با توجه به این که سیال مغناطیسی در مقایسه با گاز یک ماده تراکم ناپذیر بوده و گاز تحت فشار قابلیت تراکم پذیری دارد، تغییر حجمی به وجود آمده در سیال مغناطیسی باعث انقباض و یا انبساط گاز تحت فشار می‌شود. این تغییرات منجر به افزایش و

یا کاهش فشار در گاز شده و در نهایت تغییر سختی میراگر را به دنبال دارد. در این بخش به بررسی میزان اثر این تغییرات بر سختی میراگر ابداعی می‌پردازیم. تغییرات حجمی سیال مغناطیسی ناشی از تغییرات دمایی را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$dV_{MR} = V_{0MR} \beta \Delta t \quad (31-3)$$

که در آن V_{0MR} حجم اولیه سیال مغناطیسی، β ضریب انبساط حجمی سیال مغناطیسی و Δt تغییرات دمایی محیط است. تغییر حجمی به وجود آمده در سیال مغناطیسی به گاز تحت فشار منتقل می‌شود. علاوه بر این، گاز تحت فشار تحت تأثیر تغییرات دمایی محیط نیز است. در این صورت تغییرات فشار گاز تحت فشار ناشی از تغییر حجمی سیال مغناطیسی و تغییر دمایی محیط را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$\frac{p_{IG} V_{IG}}{T_1} = \frac{p_{0G} V_{0G}}{T_0} \quad (32-3)$$

که در آن V_{0G} و V_{IG} به ترتیب حجم اولیه و حجم تغییر یافته گاز تحت فشار، p_0 و p_1 به ترتیب فشار اولیه و فشار تغییر یافته گاز تحت فشار و T_0 و T_1 به ترتیب دمای اولیه و ثانویه گاز تحت فشار بر حسب درجه کلوین است. با بازنویسی معادله (۳۲-۳) داریم:

$$\frac{p_{IG}}{p_{0G}} = \frac{T_1}{T_0} \times \frac{V_{0G}}{V_{0G} - dV_{MR}} \quad (33-3)$$

حجم اولیه سیال مغناطیسی و گاز تحت فشار را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$V_{0G} = L_{0G} A \quad , \quad V_{0MR} = L_{0MR} A \quad (34-3)$$

که در آن A برابر سطح مقطع داخلی سیلندر، L_{0MR} طول اولیه مخزن سیال مغناطیسی و طول اولیه مخزن گاز است. با جایگذاری روابط (۳۴-۳) و (۳۱-۳) در معادله (۳۳-۳) داریم:

$$\frac{p_{IG}}{p_{0G}} = \frac{T_1}{T_0} \times \frac{L_{0G}}{(L_{0G} - L_{0MR} \beta \Delta t)} \quad (35-3)$$

با توجه به هندسه خاص میراگر ابداعی، طول اولیه مخزن سیال مغناطیسی را سه برابر طول اولیه مخزن گاز در نظر می‌گیریم. با فرض این که دمای گاز تحت فشار و سیال مغناطیسی در هنگام ساخت میراگر برابر با دمای اتاق (۲۲ درجه سانتیگراد) باشد و با توجه به این که میراگر در فضای

داخلی ساختمان نصب می‌شود، حداکثر میزان تغییرات دمایی محتمل برای میراگر را برابر $\pm 10^\circ\text{C}$ درجه سانتیگراد فرض می‌کنیم. با توجه به این که سیال مغناطیسی غالباً بر پایه روغن ساخته می‌شود، ضریب انبساط حجمی سیال مغناطیسی را برابر روغن در نظر می‌گیریم ($\beta = 0.0007$). با توجه به فرضیات فوق و برای افزایش $+10^\circ\text{C}$ درجه سانتیگرادی دمای محیط:

$$\frac{p_{1G}}{p_{0G}} = \frac{305}{295} \times \frac{1}{0.979} = 1.056 \quad (36-3)$$

و برای کاهش -10°C درجه سانتیگرادی دمای محیط:

$$\frac{p_{1G}}{p_{0G}} = \frac{285}{295} \times \frac{1}{1.021} = 0.946 \quad (37-3)$$

همان طوری که ملاحظه می‌شود میزان تغییرات فشار گاز ناشی از تغییر دمایی به اندازه $\pm 10^\circ\text{C}$ درجه سانتیگراد نسبت به دمای اتاق، در حدود 5/5٪ است که این مقدار قابل چشم پوشی است. در صورتی که میراگر در فضای خارجی ساختمان نصب شود و یا تغییرات دمایی بیش از مقدار محاسبه شده در این بخش باشد، می‌توان اثر تغییرات دمایی را با عایق نمودن سطح خارجی سیلندر از بین برد.

فصل چهارم

طراحی، ساخت و تست میراگر

MR-HSRD

۱-۴- مقدمه

در این فصل طراحی و ساخت میراگر ابداعی مورد بررسی قرار گرفته و صحت مدل‌های ریاضی به دست آمده در فصل سوم با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی سنجیده و تایید می‌شود. همان طوری که در فصل سوم تشریح شد میراگر MR-HSRD شامل یک سیستم سیلندر-پیستون با پیکربندی خاص است که دو طرف سیلندر توسط یک لوله کنارگذر که یک شیر کنترل و یک شیر مغناطیسی بر روی آن نصب شده، به یکدیگر متصل گردیده است. پیکربندی خاص میراگر MR-HSRD باعث می‌شود که در هنگام بسته بودن شیر کنترل، گاز تحت فشار مانند یک فنر عمل کرده و انرژی ورودی را در خود ذخیره کند. در لحظه مناسب، با باز تنظیم شدن میراگر (باز شدن شیر کنترل و جریان یافتن سیال مغناطیسی از درون شیر مغناطیسی به سمت دیگر سیلندر) انرژی ذخیره شده با استفاده از مکانیزم تشریح شده در فصل سوم تلف می‌شود. بدین ترتیب میراگر MR-HSRD از دو بخش ذخیره و اتلاف انرژی تشکیل شده است که هر یک از آن‌ها به طور جداگانه بررسی می‌شود. بخش ذخیره انرژی در واقع یک فنر گازی است که مشخصات سختی این فنر در بخش ۳-۳ با استفاده از روابط ریاضی به دست آمد. بخش اتلاف انرژی میراگر مربوط به شیر مغناطیسی است که معادلات ریاضی حاکم بر آن در بخش ۴-۳ تشریح شد. در این فصل هر یک از این بخش‌ها به طور جداگانه بررسی شده و نمونه‌های آزمایشگاهی به منظور تایید مدل‌های ریاضی ساخته و تست شده است.

۲-۴- طراحی و ساخت میراگر ابداعی

طراحی میراگر MR-HSRD بستگی مستقیم به میزان سختی مورد نیاز میراگر دارد که به واسطه آن نیروی مقاوم و ظرفیت اتلاف انرژی میراگر محاسبه می‌شود. سختی میراگر به عنوان اصلی ترین پارامتر طراحی میراگر MR-HSRD با توجه به نیاز لرزه‌ای سازه‌ای که این میراگرها در آن نصب می‌شوند، به دست می‌آید. در این بخش طراحی ابعادی میراگر MR-HSRD به همراه طراحی شیر مغناطیسی متناسب با میزان سختی و اتلاف انرژی مورد نیاز بررسی می‌شود.

۴-۲-۱- طراحی ابعادی میراگر

همان طوری که در بخش ۳-۳ ملاحظه گردید، سختی میراگر را می‌توان با استفاده از رابطه خطی (۳-۱۱) و یا با استفاده از رابطه غیرخطی (۳-۱۵) محاسبه نمود.

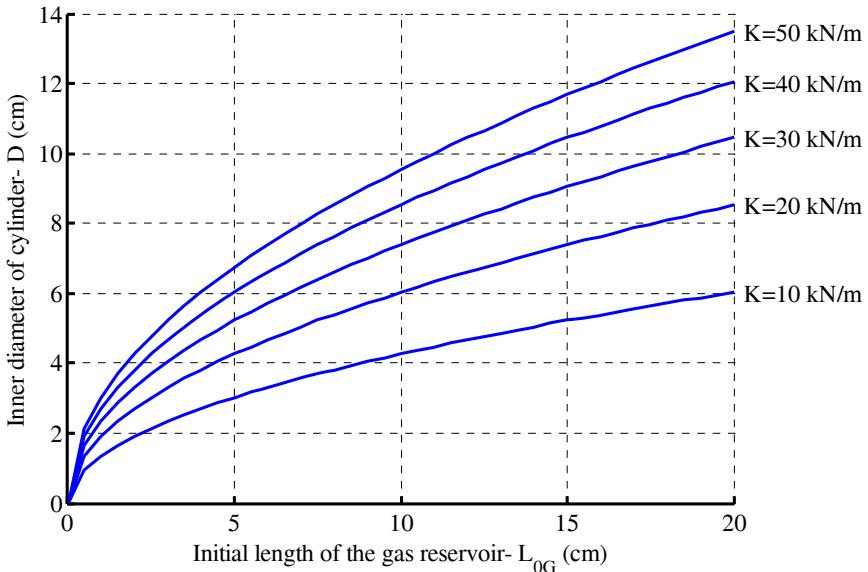
$$K_{dLin} = K_G = \frac{2((\pi D^2/4) - A_s)^2 \gamma p_{0G}}{[(\pi D^2/4)L_{0G} + V_{con}]} \quad (3-11- تکراری)$$

$$K_{dNonlin} = \frac{2(\pi D^2/4 - A_s)^2 \gamma p_{0G}}{[(\pi D^2/4)L_{0G} + V_{con}]} + \frac{(\pi D^2/4 - A_s)^4 (\gamma + 1)(\gamma + 2)p_{0G}}{3[(\pi D^2/4)L_{0G} + V_{con}]^3} x^2 \quad (3-15- تکراری)$$

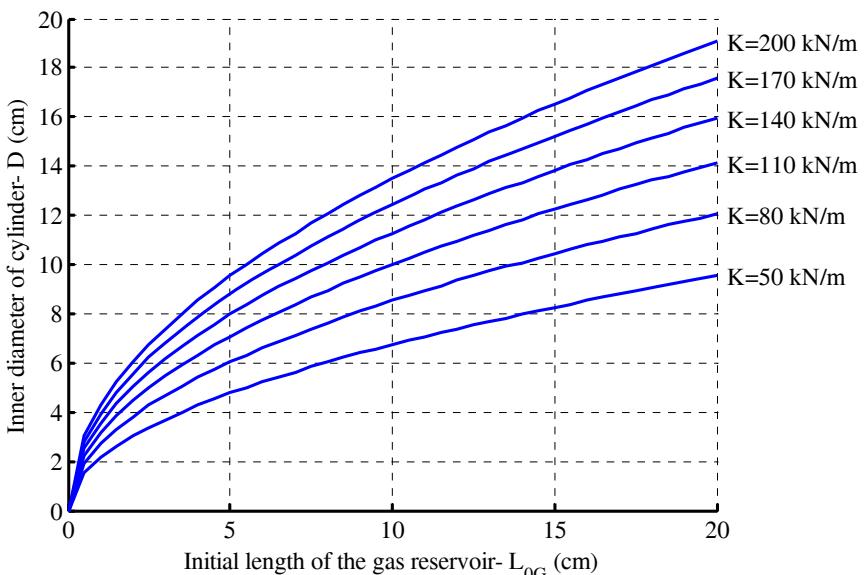
همان طور که در این روابط مشاهده می‌شود، سختی میراگر متناسب با پارامترهای هندسی میراگر مانند قطر داخلی سیلندر (D)، طول اولیه مخزن گاز تحت فشار (L_{0G})، سطح مقطع شفت (A_s)، و حجم ثابت موجود در مخزن گاز تحت فشار (V_{con}) است. علاوه بر این سختی میراگر ارتباط مستقیمی با فشار اولیه گاز تحت فشار (p_{0G}) دارد. در این میان پارامترهای D , L_{0G} و p_{0G} به عنوان پارامترهای قابل انتخاب، نقش تعیین کننده‌ای در میزان سختی میراگر MR-HSRD دارند. سختی میراگر ارتباط مستقیم با مقدار D و p_{0G} داشته و با L_{0G} ارتباط معکوس دارد. برای طراحی میراگر، ابتداً متناسب با نیاز طراحی لرزه‌ای و سختی مورد نیاز میراگر، مقدار اولیه‌ای برای D در نظر گرفته می‌شود. L_{0G} ، میزان حداکثر جابجایی پیستون یا همان کورس پیستون را مشخص می‌نماید که متناسب با نیاز طراحی لرزه‌ای و بر اساس حداکثر تغییر مکان نسبی پیش‌بینی شده در سازه انتخاب می‌شود. همچنین در میراگر MR-HSRD این قابلیت وجود دارد که حتی پس از ساخته و نصب شدن میراگر نیز این پارامتر را تغییر داد. این کار به سادگی و با تغییر حجم سیال مغناطیسی درون سیلندر انجام پذیر است. پارامتر p_{0G} به عنوان یک پارامتر متغیر قابل تنظیم این امکان را فراهم می‌نماید تا برای مقادیر معین D و L_{0G} ، بدون نیاز به تغییر، محدوده وسیعی برای سختی میراگر قابل حصول باشد. این کار به سادگی و با کم و زیاد کردن فشار اولیه گاز تحت فشار با استفاده از یک پمپ هوای دستی یا الکتریکی امکان پذیر است.

با فرض رفتار خطی برای میراگر MR-HSRD و با فرض ناچیز بودن A_s و V_{con} ، گراف‌های طراحی اولیه میراگر را با استفاده از معادله (۳-۱۱) می‌توان ترسیم نمود. در شکل ۴-۱ الی شکل ۴-۳ این گراف‌ها به ترتیب برای مقادیر $p_{0G} = ۲۵۰, ۵۰۰, ۱۰۰۰$ kN/m² ترسیم شده‌اند. طراحی ابعادی

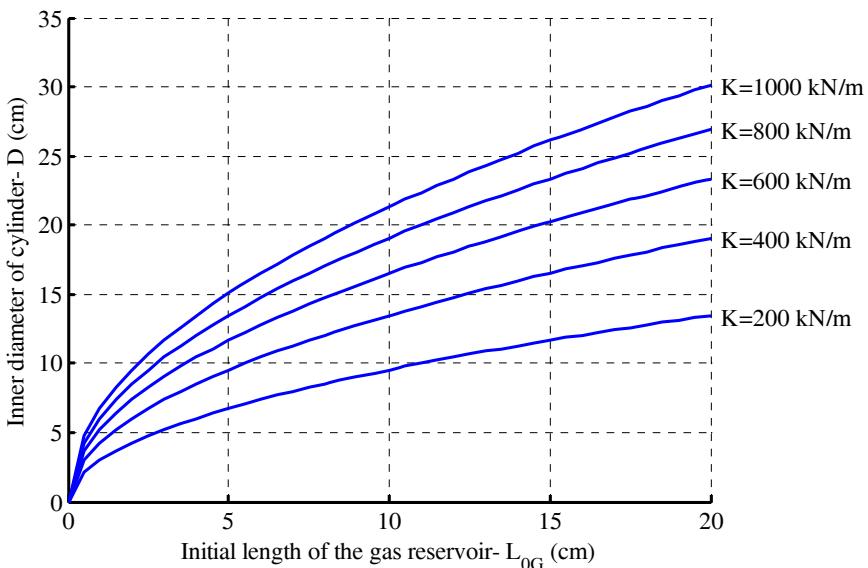
میراگر با استفاده از این گرافها و بسته به محدوده سختی مورد نیاز برای میراگر صورت می‌پذیرد. با در نظر گرفتن شکل ۴-۱، برای $p_{0G}=250 \text{ kN/m}^2$ محدوده سختی بین $100-50 \text{ kN/m}^2$ برای $K=40 \text{ kN/m}$ محدوده سختی بین $50-200 \text{ kN/m}^2$ برای $K=50 \text{ kN/m}$ قابل حصول است. در شکل ۴-۲ برای $p_{0G}=500 \text{ kN/m}^2$ محدوده سختی بین $50-200 \text{ kN/m}^2$ قابل دسترس است. در صورت نیاز به میراگر با سختی بزرگ‌تر می‌توان از شکل ۴-۳ که در آن $p_{0G}=1000 \text{ kN/m}^2$ است، به مقادیری بین $200-1000 \text{ kN/m}^2$ برای سختی دست یافت.



شکل ۴-۱- رابطه بین سختی میراگر با قطر داخلی سیلندر (D) و طول اولیه مخزن گاز (L_{0G}) برای $p_{0G}=250 \text{ kN/m}^2$



شکل ۴-۲- رابطه بین سختی میراگر با قطر داخلی سیلندر (D) و طول اولیه مخزن گاز (L_{0G}) برای $p_{0G}=500 \text{ kN/m}^2$



شکل ۴-۳- رابطه بین سختی میراگر با قطر داخلی سیلندر (D) و طول اولیه مخزن گاز (L_{0G}) برای $p_{0G}=1000 \text{ kN/m}^2$

۲-۲-۴- طراحی شیر مغناطیسی

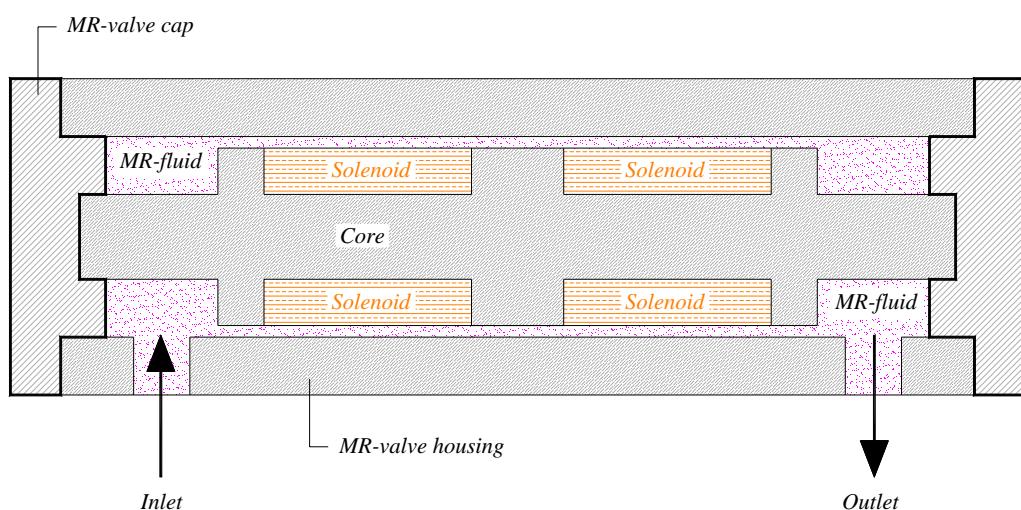
در بخش ۴-۳ مکانیزم اتلاف انرژی شیر مغناطیسی تشریح گردید. شکل ۴-۴ شماتیک یک شیر مغناطیسی را نشان می‌دهد. همان طوری که در شکل مشخص شده است شیر مغناطیسی از پنج بخش اصلی تشکیل شده است که عبارتند از یک بدنه سیلندری شکل که معمولاً از یک ماده رسانای مغناطیسی ساخته می‌شود. یک شفت دمبلی شکل که بایستی از یک ماده رسانا با نفوذپذیری مغناطیسی بالا ساخته شود، یک سیم پیچ یا سولنؤید^{۱۵۷} که نقش آهنربای مغناطیسی را ایفا می‌کند، دو عدد درپوش که بایستی از ماده غیر رسانای مغناطیسی ساخته شود و سیال مغناطیسی که به عنوان سیال عملکردی در درون شیر جریان دارد. این شیر مغناطیسی بر روی لوله کنار گذر نصب شده و دو طرف سیلندر اصلی میراگر MR-HSRD را به یکدیگر متصل می‌نماید. هنگامی که جریان الکتریکی به سولنؤید اعمال می‌شود، باعث تشکیل یک آهنربای الکترومغناطیسی در شفت شیر مغناطیسی می‌گردد به گونه‌ای که یک سر شفت قطب N و سر دیگر قطب S آهنربا می‌شود. همواره یک جریان مغناطیسی از قطب N به قطب S آهنربا وجود دارد و شدت میدان مغناطیسی در قطب‌ها حداکثر است. جریان مغناطیسی همواره تمایل دارد که از موادی با بیشترین میزان ضریب نفوذپذیری

^{۱۵۷} Solenoid

مغناطیسی و از طریق کوتاه ترین مسیر ممکن از یک قطب به قطب دیگر آهن ربا جریان یابد. با استفاده از این اصل و با به کار گیری مواد عایق مغناطیسی در کنار موادی با نفوذپذیری بالا امکان شکل دهی، هدایت و متوجه نمودن جریان مغناطیسی فراهم می‌شود. در واقع طراحی هندسی شیر مغناطیسی هم با استفاده از همین اصل انجام می‌شود.

طراحی دمبلي شکل شفت باعث می‌شود که لبه‌های شفت به عنوان قطب آهن ربا عمل نماید.

طراحی بصورتی انجام می‌شود که شعاع داخلی بدنه سیلندری شکل شیر مغناطیسی در حدود ۲ mm تا ۱ بزرگ‌تر از شعاع قسمت دمبلي شکل یا همان قطب‌ها باشد. این موضوع باعث به وجود آمدن یک درز^{۱۵۸} کوچک بین قطب‌ها و بدنه می‌شود و یک مسیر حلقوی شکل را برای عبور سیال مغناطیسی فراهم می‌کند. اندازه درز بستگی به وظیفه عملکردی شیر مغناطیسی دارد. در کاربردهای عملی به منظور سهولت ساخت و اسambil کردن شیر مغناطیسی، اندازه درز در محدوده بین ۰/۵ mm تا ۲ mm انتخاب می‌شود [۸۳].

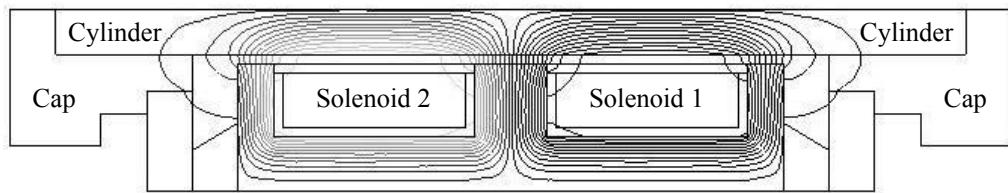


شکل ۴-۴- مقطع عرضی از یک شیر مغناطیسی.

در شکل ۴-۵ مسیر جریان مغناطیسی در یک شیر مغناطیسی نشان داده شده است که دارای دو سولنوئید می‌باشد. هنگامی که جریان الکتریکی در یک سولنوئید برقرار می‌شود، جریان مغناطیسی به وجود آمده مسیری مطابق شکل را طی کرده و پس از خارج شدن از قطب N، از درز بین لبه دمبلي شکل و بدنه سیلندری عبور کرده و سیال مغناطیسی موجود در این درز را تحریک می‌کند. در ادامه،

¹⁵⁸ Gap

جريان مغناطیسی وارد بدن سیلندر می‌شود و دوباره با عبور از درز بین سیلندر و لبه دمبلی شکل و تحریک سیال مغناطیسی موجود در این درز وارد قطب S می‌شود. دلیل استفاده از شفت با دو سولنوئید مشابه، افزایش طول قطب‌ها و در نتیجه سطح سیال مغناطیسی تحریک شده است که نهایتاً منجر به افزایش نیروی لازم برای برش سیال مغناطیسی تحریک شده می‌شود. در شیر مغناطیسی نشان داده شده در شکل ۴-۵ جریان الکتریکی در دو سولنوئید برعکس یکدیگر است تا از خنثی شدن میدان مغناطیسی در قطب میانی جلوگیری شود و خطوط میدان در قطب میانی هم راستا باشند.



شکل ۴-۵- مسیر جریان مغناطیسی در شیر مغناطیسی.

با توجه به پیچیدگی ساختار شیر مغناطیسی، پارامترهای مختلفی می‌تواند رفتار آن را تحت تأثیر قرار دهد که بایستی در طراحی شیر مغناطیسی لاحظ گردد. متغیرهای موثر در طراحی شیر مغناطیسی را می‌توان به دو دسته تقسیم نمود. دسته اول شامل متغیرهای هندسی است که مربوط به ابعاد هندسی هر یک از اجزا شیر مغناطیسی است. دسته دوم متغیرهای مربوط به مشخصات مغناطیسی مواد تشکیل دهنده شیر مغناطیسی است. عملکرد شیر مغناطیسی را می‌توان بسته به نیاز طراحی و وظیفه‌ای که برای شیر مغناطیسی در نظر گرفته شده است، بهینه نمود. بهینه‌سازی طراحی با توجه به تابع هدف بر روی هر دو دسته از متغیرها به صورت هم زمان انجام می‌شود. این امر منجر به وجود آمدن یک بازه بسیار محدود برای انتخاب هر یک از پارامترهای طراحی می‌شود که کوچکترین انحرافی از این محدوده منجر به عملکرد نامناسب شیر مغناطیسی می‌گردد. در فرآیند بهینه‌سازی طراحی شیر مغناطیسی معمولاً در ابتدا مشخصات مغناطیسی سیال مغناطیسی، ماده به کار رفته در شفت و سیلندر و ماده‌ای را که درپوش از آن ساخته شده را تعیین می‌کنند. مشخصات مغناطیسی مواد شامل ضریب نفوذپذیری مغناطیسی ماده (μ)، منحنی H-B (منحنی چگالی شار

مغناطیسی (B) به شدت میدان مغناطیسی (H) و حد اشباع مغناطیسی مواد می‌شود. پس از تعیین مشخصات مغناطیسی مواد تشکیل دهنده شیر مغناطیسی که معمولاً با استفاده از آزمایش‌های دقیق به دست می‌آید، پارامترهای هندسی شیر مغناطیسی با توجه به تابع هدف بهینه سازی، طراحی می‌شود. مهمترین پارامتر هندسی در طراحی شیر مغناطیسی، مقدار درز بین قطب‌ها و بدنه سیلندر است که رفتار شیر مغناطیسی را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد.

بهینه‌سازی را می‌توان بسته به وظیفه عملکردی شیر مغناطیسی از دیدگاه‌های مختلفی انجام داد و بسته به تابع هدف بهینه سازی، ممکن است ابعاد متفاوتی برای شیر مغناطیسی به دست آید. بهینه‌سازی ممکن است برای حداکثر نمودن ضریب میرایی شیر مغناطیسی وقتی به عنوان یک میراگر استفاده می‌شود صورت پذیرد [۸۸]. تابع هدف بهینه‌سازی می‌تواند مینیمم کردن نسبت والو (λ_{valve}) [۸۹] و یا مینیمم کردن توان مصرفی و زمان عکس العمل شیر مغناطیسی [۹۰] و یا ترکیبی از موارد فوق باشد [۹۱، ۹۲]. با توجه به وظیفه عملکردی شیر مغناطیسی در میراگر MR-HSRD، بهینه‌سازی شیر مغناطیسی را می‌توان بر اساس حداکثر کردن افت فشار شیر مغناطیسی (Δp_{min})، که در معادله (۳-۲۶) تعریف شده، انجام داد [۹۳].

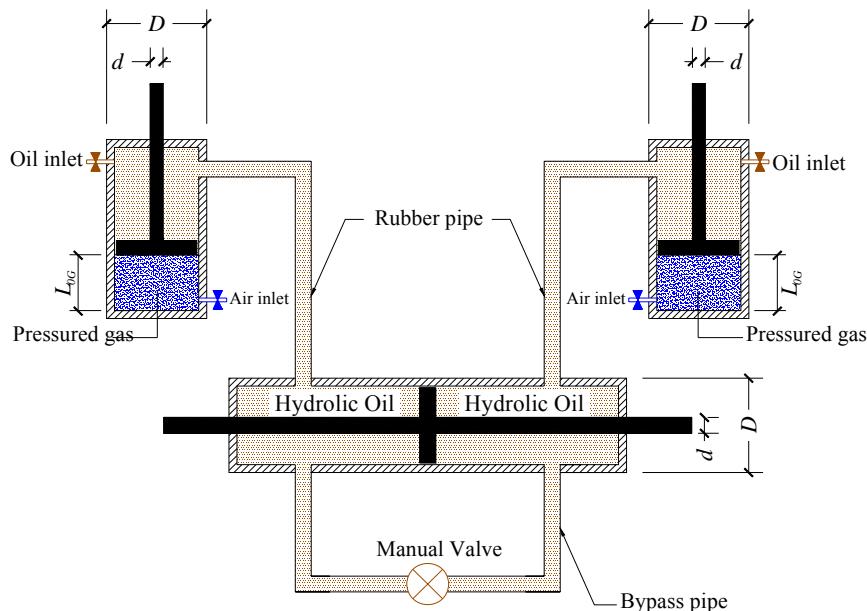
۱-۳-۴- نمونه شماره ۱

به منظور بررسی پارامترهای موثر بر سختی میراگر، نمونه شماره ۱ طراحی و ساخته شده است. با توجه به این که در این بخش تنها رفتار میراگر از نظر سختی بررسی می‌شود، لذا بخش اتلاف انرژی که شامل شیر مغناطیسی و سیال مغناطیسی می‌باشد از پیکربندی میراگر حذف شده است. با در نظر گرفتن یک مقدار معین برای قطر سیلندر (D)، سایر پارامترهای تأثیرگذار بر سختی میراگر عبارتند از: L_{0G} و p_{0G} که در این بخش اثر این پارامترها با استفاده از تست‌های متعدد بررسی می‌گردد.

۱-۳-۴- مشخصات طراحی نمونه شماره ۱

نمونه شماره ۱ به گونه‌ای طراحی شده است که امکان تنظیم طول اولیه مخزن گاز تحت فشار (L_{0G}) به سادگی فراهم شود تا بتوان اثر L_{0G} ‌های مختلف را بر سختی میراگر بررسی نمود. بدین منظور مخازن گاز تحت فشار که در شکل ۳-۱ در دو طرف سیلندر اصلی قرار گرفته‌اند، از سیلندر اصلی جدا

شده‌اند و مطابق شکل ۴-۶ با استفاده از یک سری شیلنگ فشار قوی به سیلندر اصلی وصل شده‌اند. در میراگر MR-HSRD وقتی که شیر کنترل میراگر بسته است میراگر در برابر حرکت پیستون مقاومت می‌کند. با توجه به این که در این بخش فقط رفتار میراگر از نظر سختی بررسی می‌شود، لذا شیر کنترل در طول آزمایش همواره بسته است. بنابراین به جای استفاده از شیر کنترل و شیر مغناطیسی از یک شیر ساده باز-بسته دستی که در لوله کنار گذر نصب شده، استفاده شده است. همچنین با توجه به عدم وجود شیر مغناطیسی و مکانیزم اتلاف انرژی، در نمونه شماره یک از روغن هیدرولیک به جای سیال مغناطیسی استفاده شده است. شماتیک پیکربندی نمونه شماره ۱ در شکل ۴-۶ نمایش داده شده است.

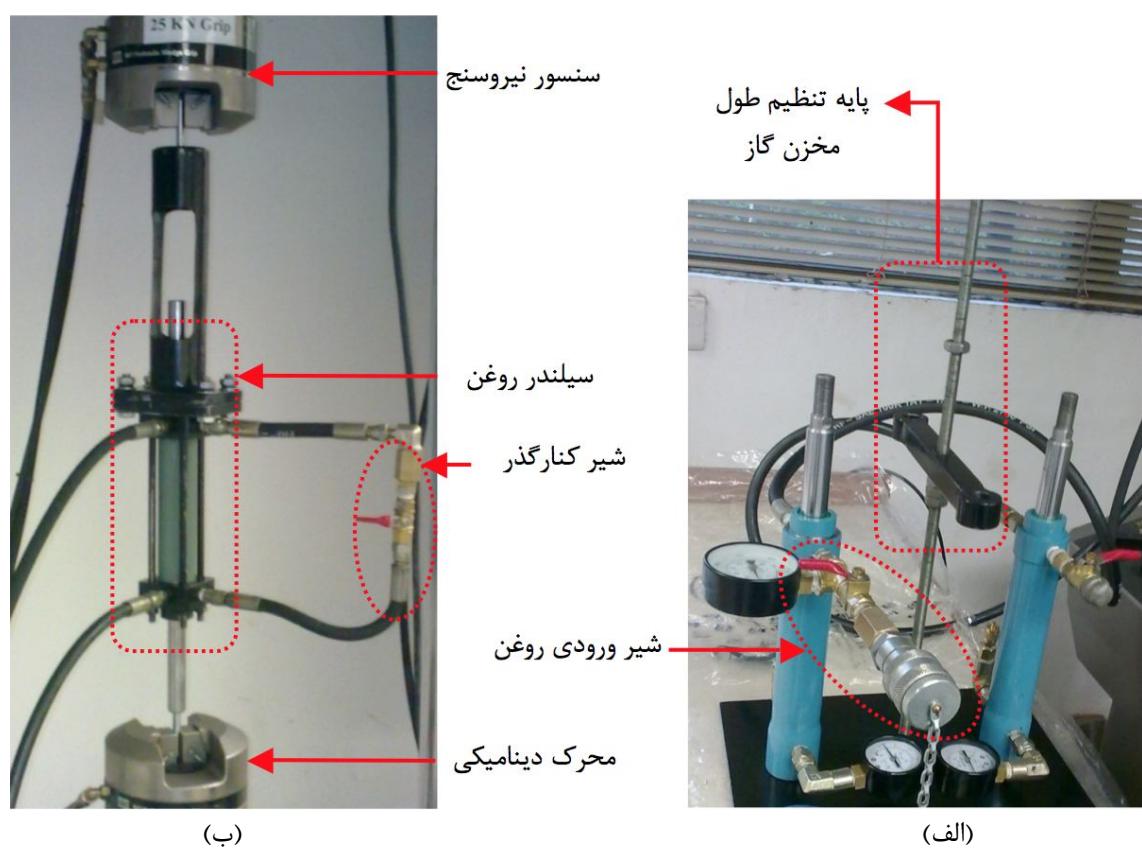


شکل ۴-۶- طرح شماتیک میراگر شماره ۱.

تغییر طول مخزن گاز باعث کاهش یا افزایش حجم روغن هیدرولیک موجود در سیلندر روغن می‌شود. طراحی به گونه‌ای انجام شده است که امکان پمپ کردن روغن به درون مخزن (در صورت کاهش طول مخزن گاز) و یا تخلیه روغن اضافی (ناشی از افزایش طول مخزن گاز) به سادگی امکان پذیر باشد. بدین منظور در بالاترین نقطه هر یک از مخازن‌ها یک شیر تعییه شده است که در هنگام پمپ روغن به درون سیستم، یکی از این شیرها به عنوان ورودی روغن و شیر دیگر به عنوان شیر هوایی استفاده می‌شود تا در صورت به دام افتادن حباب هوا در روغن، بدین طریق تخلیه شود. عدم هوایی روغن باعث نامعتبر شدن نتایج تست می‌شود چرا که حجم هوای به دام افتاده در روغن در محاسبات

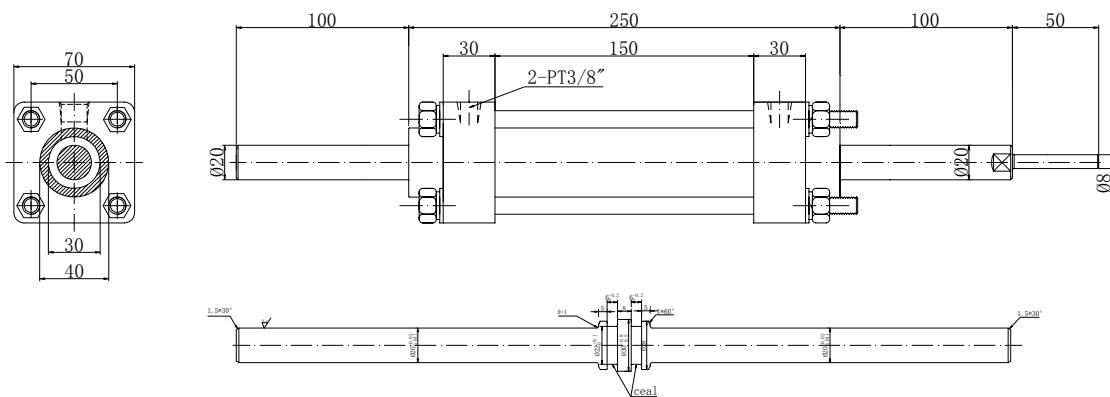
مربوط به مدل‌سازی لحاظ نشده و می‌تواند نتایج مدل‌سازی را با مشکل مواجه نماید. علاوه بر این به منظور کنترل فشار در مخازن گاز و مخزن روغن، یک سری فشارسنج در این مخازن تعبیه شده است که اجازه می‌دهد تا میزان فشار مخازن طی آزمایش اندازه‌گیری شود.

مشخصات هندسی نمونه شماره ۱ با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی و دستگاه تست دینامیکی از نظر حداکثر نیروی اعمالی و همچنین دامنه جابجایی قابل اعمال به میراگر، طراحی شده است. بدین منظور قطر داخلی سیلندر (D) برای سیلندرهای گاز و سیلندر روغن برابر 30 mm انتخاب شده است. حداکثر طول قابل تنظیم مخزن گاز (L_{0G}) به گونه‌ای طراحی شده است که امکان تنظیم طول مخزن را تا حداکثر 50 mm فراهم می‌آورد. مجموعه‌ای از تست‌های شبه استاتیکی و دینامیکی با استفاده از دستگاه تست دینامیکی MTS810 در Structural Dynamics Laboratory MTS810 در The Hong Kong Polytechnic University دانشگاه داده شده است. در شکل ۴-۷ تصویر نمونه شماره ۱ و چیدمان تست میراگر در دستگاه MTS810 نشان داده شده است.

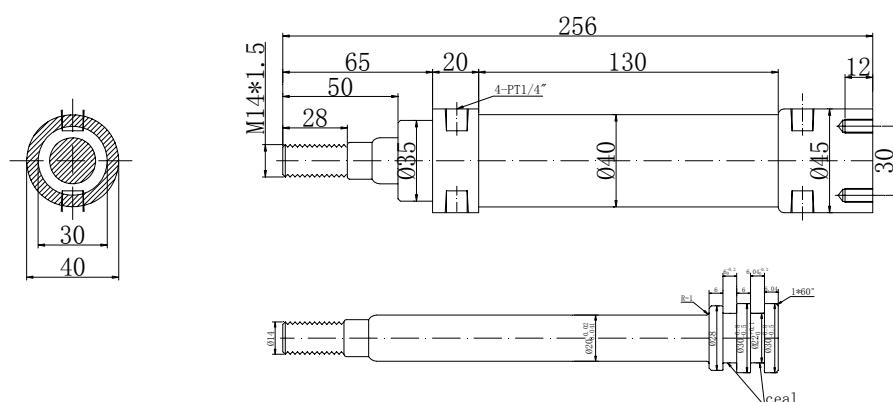


شکل ۴-۷- تصویر میراگر شماره ۱ و چیدمان تست میراگر؛ (الف) سیلندرهای گاز تحت فشار به همراه پایه قابل تنظیم برای تغییر طول مخزن گاز، (ب) سیلندر روغن به همراه شیلنگ‌های رابط و شیر کنار گذر دستی.

نقشه‌ها و ابعاد هندسی مربوط به سیلندر روغن و سیلندرهای گاز تحت فشار به ترتیب در شکل ۴-۸ و شکل ۴-۹ ارایه شده است. در نمونه شماره ۱، از چهار پارامتر موثر در سختی میراگر، دو پارامتر قطر داخلی سیلندر ($D=30\text{ mm}$) و حجم ثابت موجود در مخزن گاز تحت فشار ($V_{\text{con}}=10\text{ cm}^3$) و یا ثابت هستند. بنابراین، سختی میراگر را می‌توان با تنظیم طول اولیه مخزن گاز تحت فشار (L_{0G}) و یا فشار اولیه گاز (p_{0G}) تغییر داد. با توجه به استفاده از یک شیر یک طرفه در مخازن گاز تحت فشار (مشابه شیر به کار رفته در تایر ماشین)، کاهش و یا افزایش فشار مخزن به سادگی امکان پذیر است. کاهش فشار مخزن از طریق فشردن سوزن شیر انجام می‌شود و برای افزایش فشار مخزن از یک پمپ دستی مطابق شکل ۴-۱۰ استفاده می‌گردد.



شکل ۴-۸- نقشه سیلندر روغن (کلیه ابعاد بر حسب میلیمتر می‌باشد).

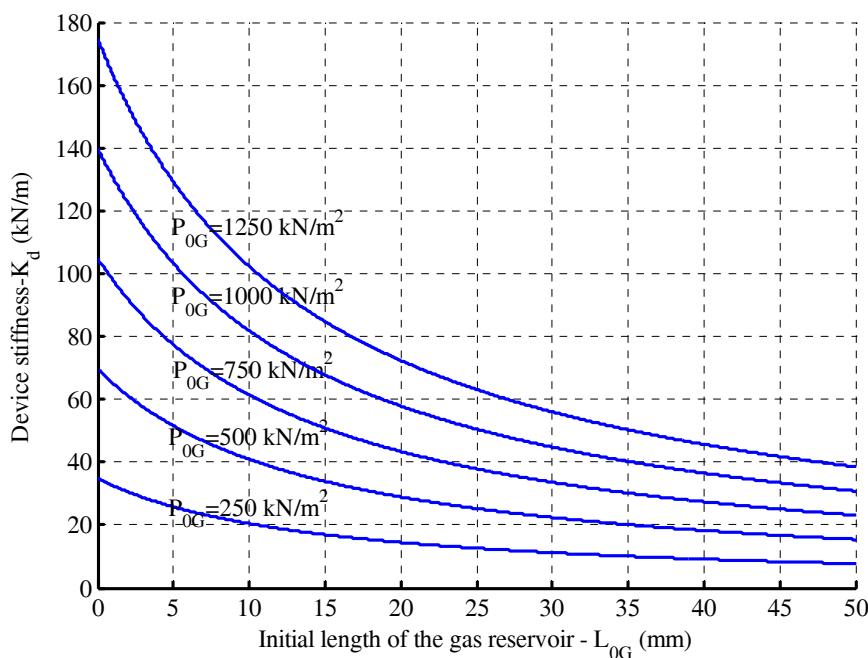


شکل ۴-۹- نقشه سیلندرهای گاز تحت فشار (کلیه ابعاد بر حسب میلیمتر می‌باشد).



شکل ۴ - ۱۰ - تغییر فشار گاز مخزن با استفاده از پمپ هوای دستی.

در شکل ۴ - ۱۱ گراف‌های مربوط به سختی نمونه شماره ۱ بر اساس طول اولیه مخزن گاز تحت فشار (L_{0G}), برای مقادیر مختلف فشار اولیه گاز (p_{0G}) بر اساس مدل خطی سختی میراگر ترسیم شده است. همان طوری که مشاهده می‌شود در نمونه شماره ۱ با تنظیم طول مخزن گاز و یا فشار اولیه گاز، طیف وسیعی از مقادیر سختی قابل دسترس است.



شکل ۴ - ۱۱ - رابطه بین سختی میراگر (K_d) و طول اولیه مخزن گاز (L_{0G}) برای مقادیر مختلف p_{0G} با فرض رفتار خطی در میراگر شماره ۱ با قطر داخلی سیلندر $D=30 \text{ mm}$ و $V_{con}=10 \text{ cm}^3$.

۴-۳-۲- تست‌های دینامیکی

مجموعه‌ای از تست‌های دینامیکی برای بررسی عملکرد دینامیکی میراگر طراحی گردیده است. این تست‌ها با استفاده از دستگاه MTS810 در دانشگاه پلی تکنیک هنگ کنگ انجام شده است. تست‌های دینامیکی را می‌توان به دو صورت کنترل نیرو^{۱۵۹} و یا کنترل تغییرمکان^{۱۶۰} انجام داد. در این تحقیق با توجه به این نکته که حداکثر تغییرمکان پیستون محدود به طول اولیه مخزن گاز است و با توجه به این که تست‌های دینامیکی به منظور بررسی اثر طول مخزن گاز و میزان دامنه جابجایی پیستون بر رفتار میراگر طرح‌ریزی شده است، تست‌های دینامیکی به صورت کنترل تغییرمکان انجام شده است. در این تست‌های دینامیکی مجموعه‌ای از تغییرمکان‌های سینوسی با دامنه مشخص و فرکانس‌های بالای Hz ۰/۱ به میراگر اعمال می‌شوند. تست‌های دینامیکی از آن جهت حائز اهمیت می‌باشند که می‌توانند رفتار واقعی میراگر را در خلال بارهای جانبی مانند باد یا زلزله مدل‌سازی کنند. این تست‌ها امکان بررسی اثرات سرعت بارگذاری و دامنه جابجایی را بر رفتار میراگر فراهم می‌نمایند.

تست‌های دینامیکی متعددی بر روی مدل شماره ۱ با سختی‌های مختلف انجام شد. بدین منظور برای طول اولیه مخزن گاز سه مقدار مختلف mm ۴۰، ۳۰ و ۲۰، L_{0G}= تنظیم گردید و هر یک از این مقادیر با سه فشار اولیه متفاوت برای مخزن گاز² kN/m² ۶۰۰، ۵۰۰ و ۲۵۰ p_{0G}= تست شد. دامنه جابجایی پیستون در هر مرحله از تست مناسب با طول اولیه مخزن گاز تنظیم شد. به طوری که برای mm L_{0G}=۲۰ دامنه جابجایی برابر mm ۱۰، برای mm L_{0G}=۳۰ دامنه‌های جابجایی برابر mm ۲۰ و برای mm L_{0G}=۴۰ دامنه‌های جابجایی برابر mm ۳۰، ۲۰، ۱۰ تنظیم شده است. نسبت‌های مختلف دامنه جابجایی به طول اولیه مخزن (x/L_{0G}) به منظور بررسی اثر نسبت‌های متفاوت بر روی رفتار میراگر در تست‌های دینامیکی مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول ۱-۴ سختی نمونه شماره ۱ با استفاده از مدل خطی ارایه شده است. در مجموع تست‌های دینامیکی برای سه فرکانس مختلف Hz ۱ و ۰/۵ f= انجام شده است. کلیه آزمایش‌ها در دو حالت انجام شده است؛ اولی در حالتی است که شیر کنترل بسته است و میراگر در برابر جابجایی پیستون مقاومت

¹⁵⁹ Force-control

¹⁶⁰ Displacement-control

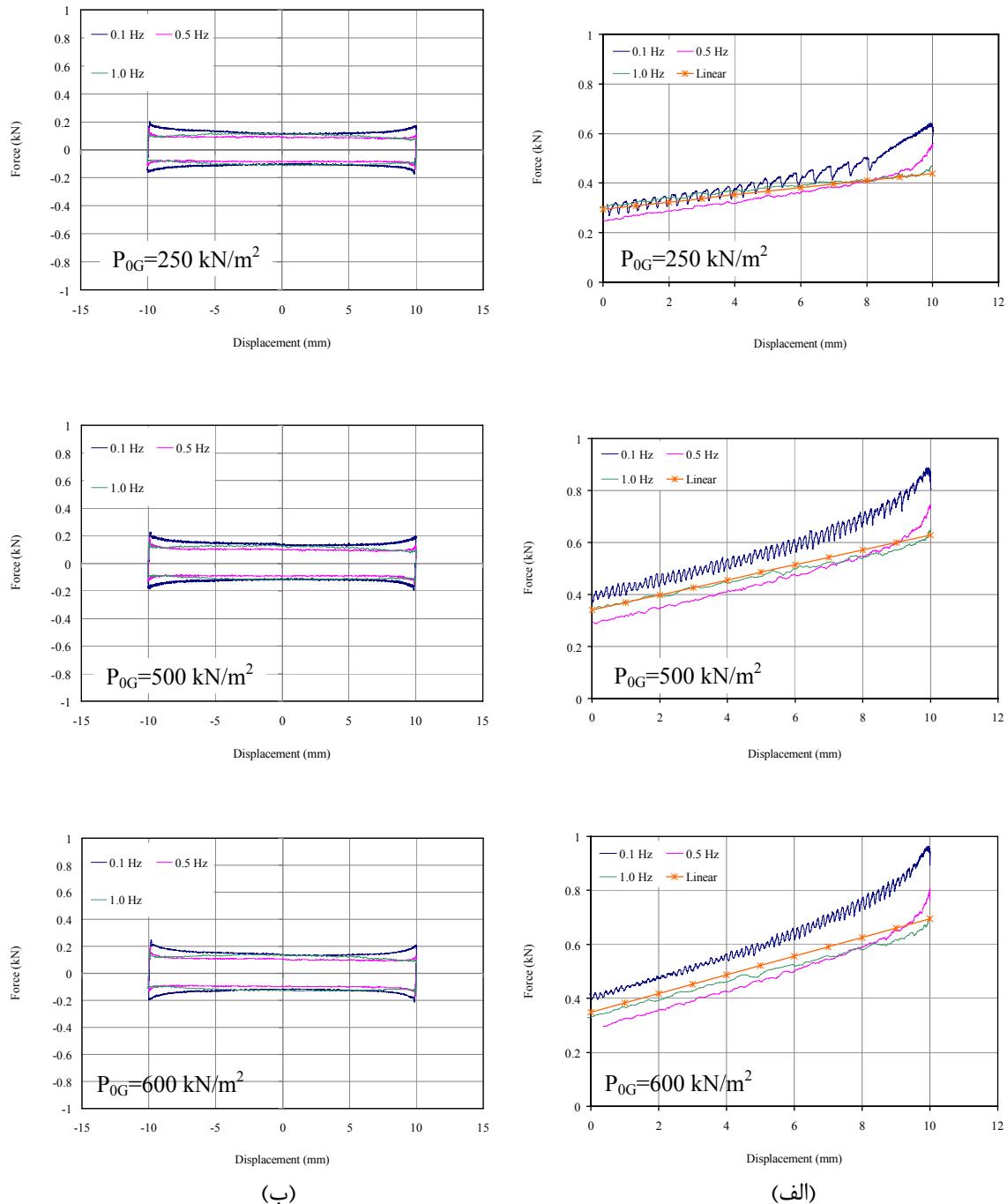
می‌نماید و دومی در حالتی است که شیر میراگر باز است و میراگر مقاومتی در برابر حرکت پیستون ندارد. تست‌های حالت شیر-باز بدین منظور انجام شده است که بتوان اثرات ناشی از نیروی اصطکاک و همچنین نیروی ویسکوز ناشی از حرکت روغن هیدرولیک در لوله‌های رابط را بررسی نمود. در هر یک از تست‌های دینامیکی به تعداد کافی سیکل‌های جابجایی به میراگر اعمال شد تا رفتار میراگر کاملاً پایدار شود و نهایتاً یکی از سیکل‌های میانی برای ترسیم انتخاب شده است. در حالت شیر-بسته نتایج مربوط به ربع اول منحنی نیرو-تغییرمکان میراگر ترسیم شده است.

جدول ۴-۱- مقادیر مختلف سختی نمونه شماره ۱ بر اساس مدل خطی برای L_{0G} و P_{0G} های متفاوت

Device Model Number	L_{0G} (mm)	K_d (kN/m)		
		P_{0G} (kN/m ²)		
		250	500	600
Prototype#1 DL 03-10	20	14.49	28.98	34.78
	30	11.21	22.42	26.90
	40	9.14	18.28	21.93

شکل ۴-۱۲ پاسخ نیرو-تغییرمکان میراگر شماره ۱ تحت فرکانس‌های مختلف برای میراگر با $L_{0G}=20$ mm تحت تغییرمکان سینوسی 10 mm را در دو حالت شیر-بسته و شیر-باز نشان می‌دهد. نسبت دامنه به طول اولیه مخزن گاز در این تست، $x/L_{0G} = 50\%$ است. همان طوری که در شکل ۴-۱۲-الف مشاهده می‌شود شبی تمام منحنی‌ها که نشان دهنده سختی میراگر است تطابق مناسبی با شبی مدل خطی پیشنهادی دارد. اختلاف کوچکی که در انتهای گراف‌ها در شکل ۴-۱۲-الف وجود دارد می‌تواند ناشی از نیروی اصطکاک بین واشرهای آب بندی پیستون‌ها و بدن سیلندر باشد. همان طوری که در این شکل مشاهده می‌گردد، گراف‌ها از صفر شروع نشده‌اند و اندکی شیفت به سمت بالا دارند. این موضوع ناشی از وجود نیروی اصطکاک و همچنین نیروی مقاوم ویسکوز است. ضمن آن که با توجه به مقاومت میراگر در ربع دوم، میزان نیروی مقاوم ربع دوم نیز به آن اضافه شده است. به منظور ارزیابی این موضوع منحنی نیرو-تغییرمکان میراگر برای حالتی که شیر کنترل باز است، در شکل ۴-۱۲-ب ارایه شده است. همان طوری که در شکل ۴-۱۲-ب مشاهده می‌شود میراگر در برابر حرکت پیستون اندکی مقاومت می‌کند. با توجه به این که این نیروی مقاوم در حالت شیر-بسته نیز وجود دارد بنابراین با نیروی مقاوم میراگر در حالت شیر-بسته جمع شده و باعث انحراف انتهای گراف‌ها به سمت بالا و همچنین عدم شروع گراف‌ها از نیروی صفر شده است. مقدار نیروی مقاوم

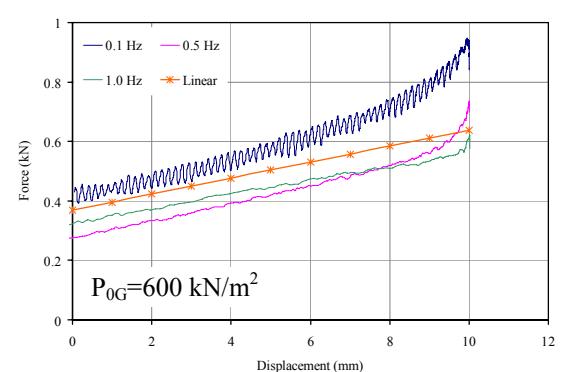
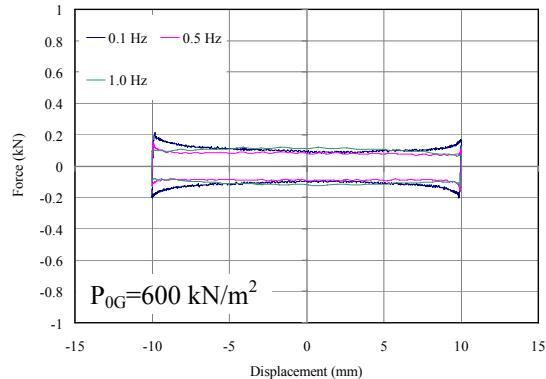
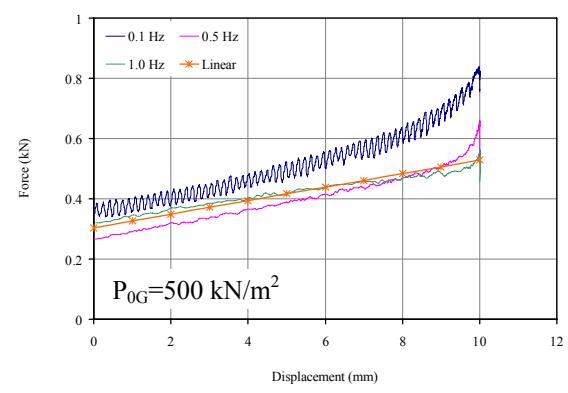
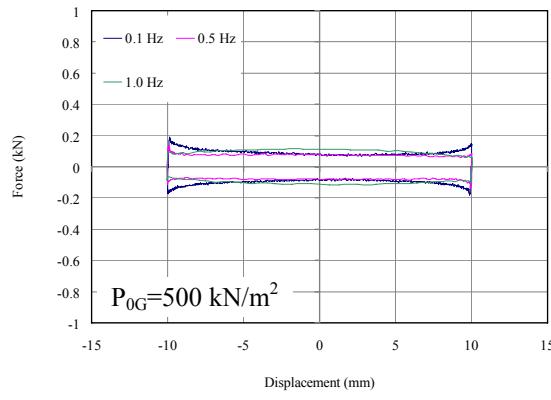
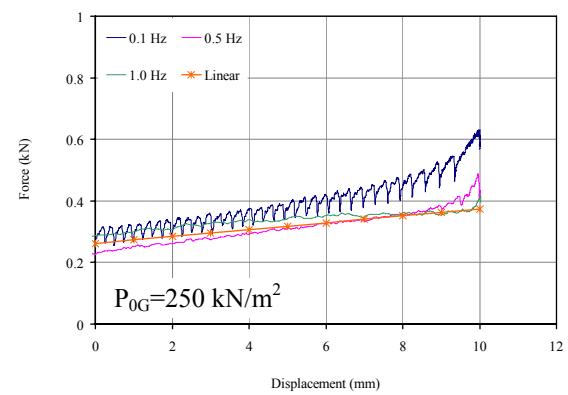
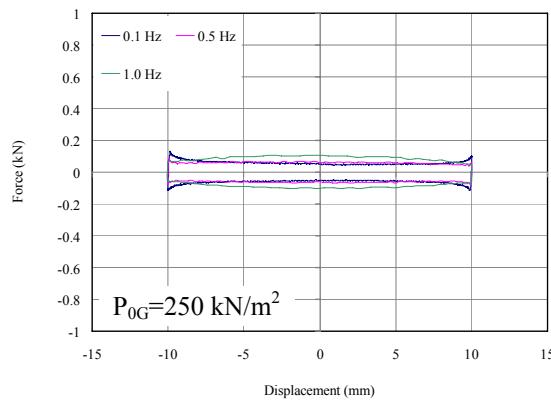
میراگر در حالت شیر-باز در تمام آزمایش‌ها تقریباً ثابت بوده و به جز نواحی انتهایی گراف‌ها که تغییر جهت حرکت پیستون داریم، در سایر نقاط حدوداً برابر 10 kN است.



شکل ۱۲-۴- پاسخ نیرو-تغییر مکان میراگر شماره ۱ به همراه مدل خطی برای میراگر با $L_{0G}=20 \text{ mm}$ ، تحت تغییر مکان سینوسی 10 mm با فرکانس‌های $1/0.5 \text{ Hz}$ و 1 Hz ؛ (الف) در حالت شیر-باز، (ب) در حالت شیر-باز.

در شکل ۴-۱۳ و شکل ۴-۱۴ پاسخ نیرو-تغییرمکان میراگر شماره ۱ تحت فرکанс‌های مختلف برای میراگر با $L_{0G}=30$ mm به ترتیب تحت تغییرمکان سینوسی ۱۰ mm و ۲۰ mm برای دو حالت شیر-بسته و شیر-باز نشان داده شده است. نسبت دامنه به طول اولیه مخزن گاز در این تست‌ها به ترتیب برابر $x/L_{0G} = 33\%$ برای تغییرمکان ۱۰ mm و $x/L_{0G} = 66\%$ برای تغییرمکان ۲۰ mm است. همان طوری که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود رفتار میراگر (به جز در نواحی انتهایی) تطبیق مناسبی با مدل خطی پیشنهادی دارد. علاوه بر این نیروی مقاوم میراگر در حالت شیر-باز بدون توجه به دامنه جابجایی، طول اولیه مخزن گاز و فشار اولیه مخزن، تقریباً ثابت بوده و حدوداً برابر 10 kN است.

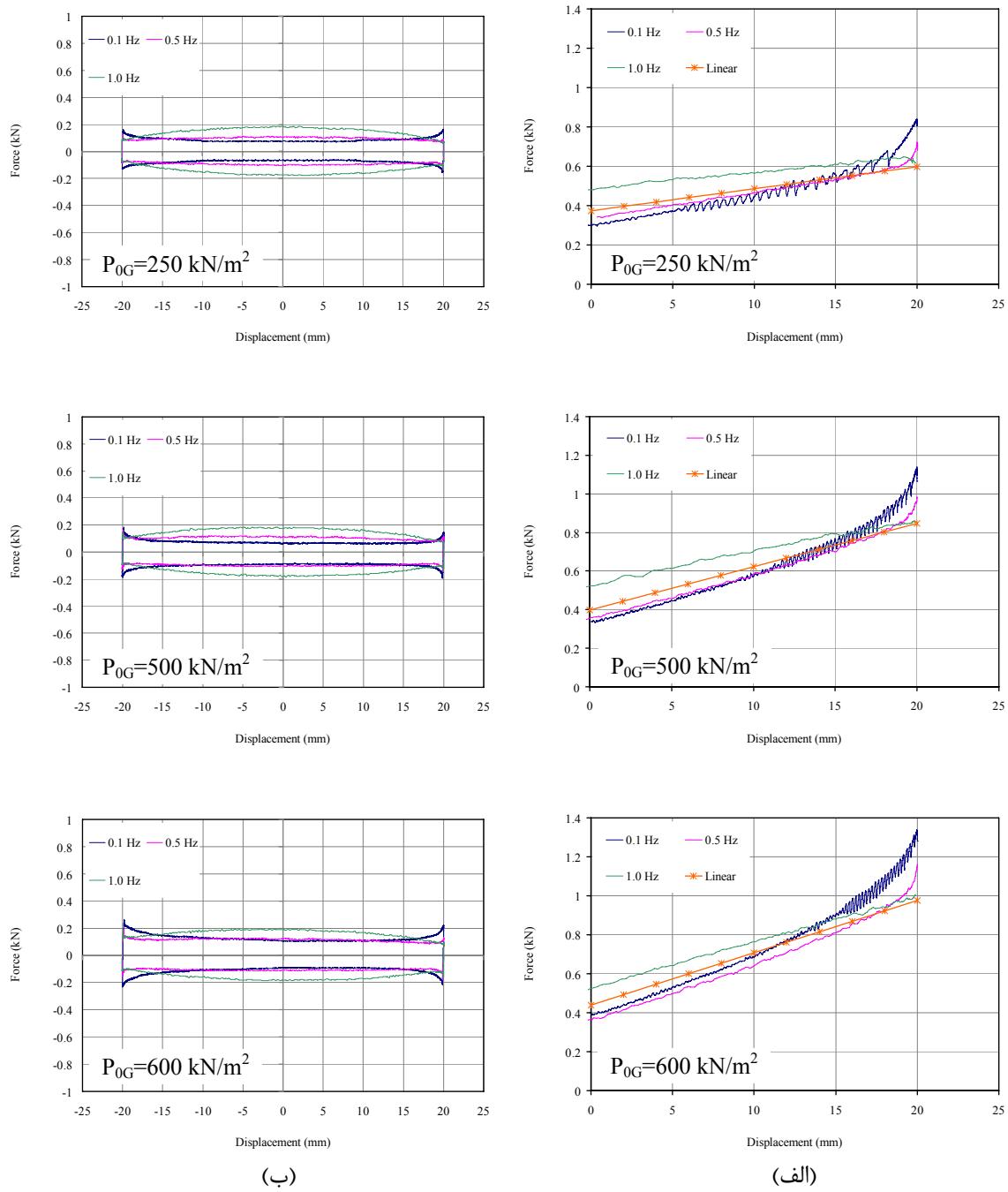
در شکل ۴-۱۵ و شکل ۴-۱۶ پاسخ نیرو-تغییرمکان میراگر شماره ۱ تحت فرکанс‌های مختلف برای میراگر با $L_{0G}=40$ mm به ترتیب تحت تغییرمکان سینوسی ۱۰ mm و ۲۰ mm برای دو حالت شیر-بسته و شیر-باز نشان داده شده است. نسبت دامنه به طول اولیه مخزن گاز در این تست‌ها به ترتیب برابر $x/L_{0G} = 25\%$ برای تغییرمکان ۱۰ mm و $x/L_{0G} = 50\%$ برای تغییرمکان ۲۰ mm است. همان طوری که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود رفتار میراگر (به جز در نواحی انتهایی) تطبیق مناسبی با مدل خطی پیشنهادی دارد. علاوه بر این نیروی مقاوم میراگر در حالت شیر-باز مستقل از دامنه جابجایی، طول اولیه مخزن گاز و فشار اولیه مخزن، تقریباً ثابت بوده و حدوداً برابر 10 kN است.



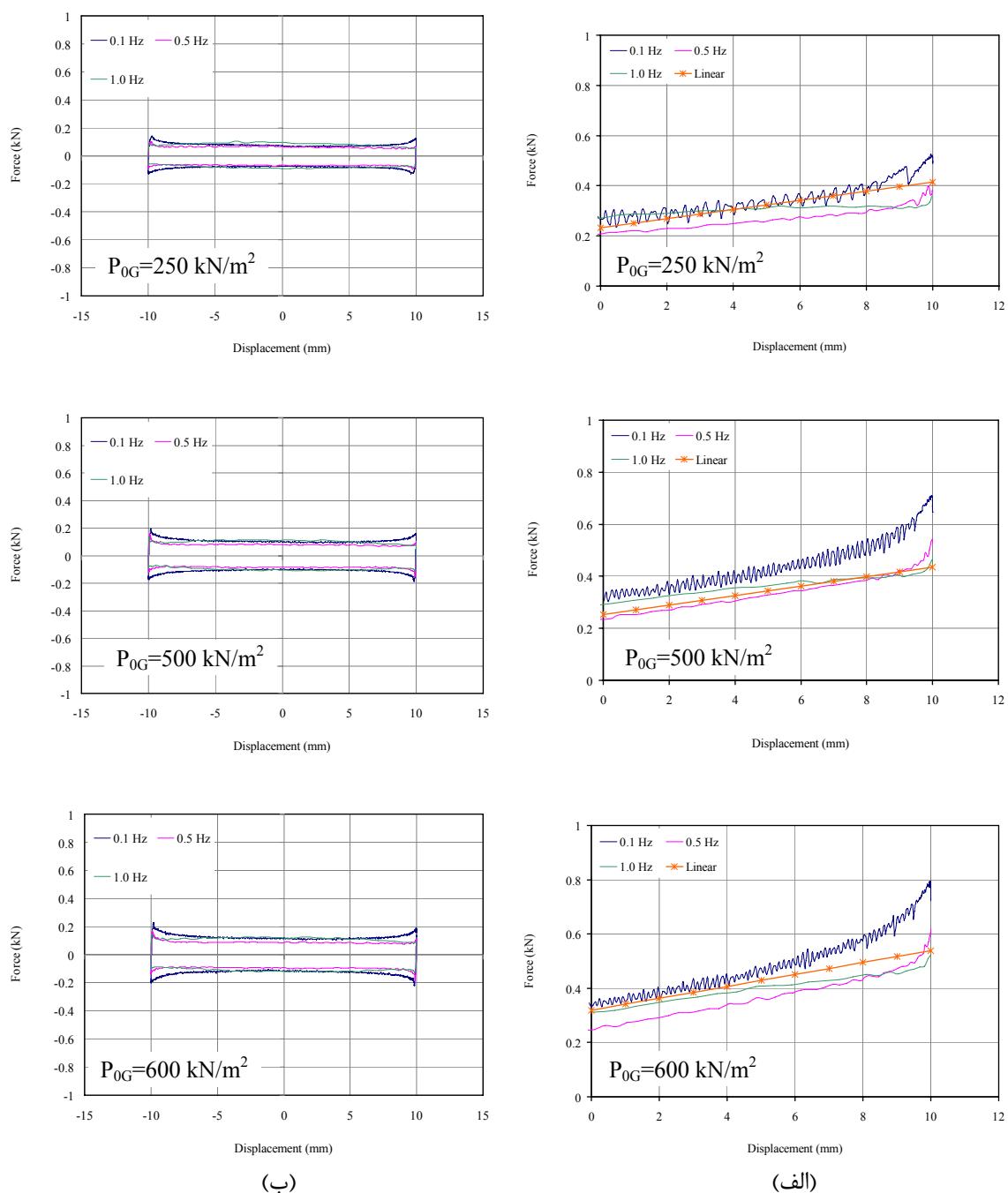
(ب)

(الف)

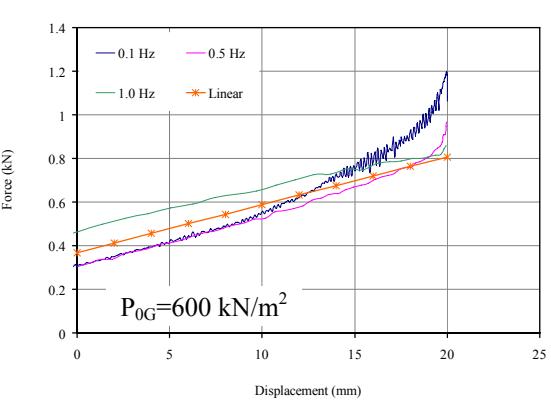
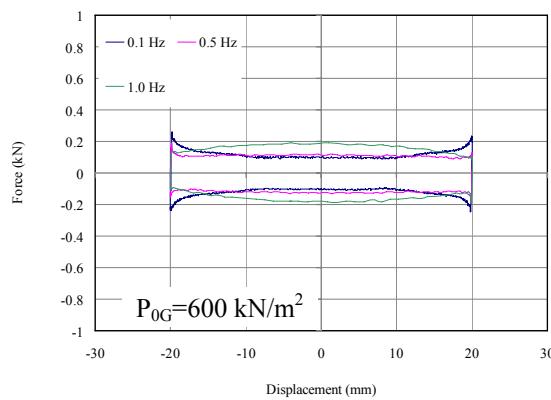
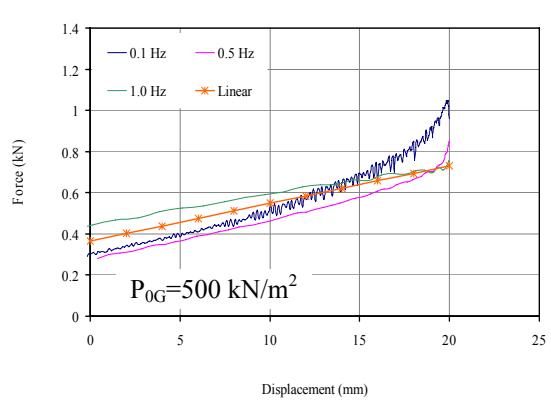
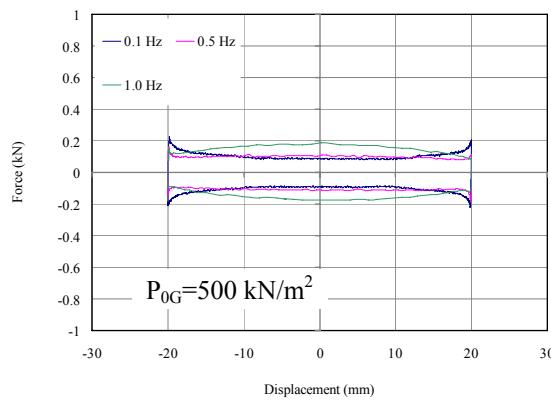
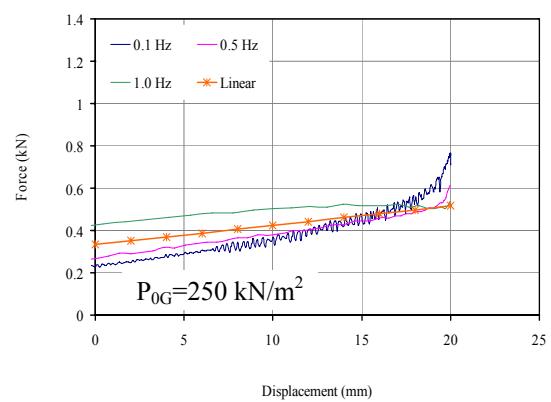
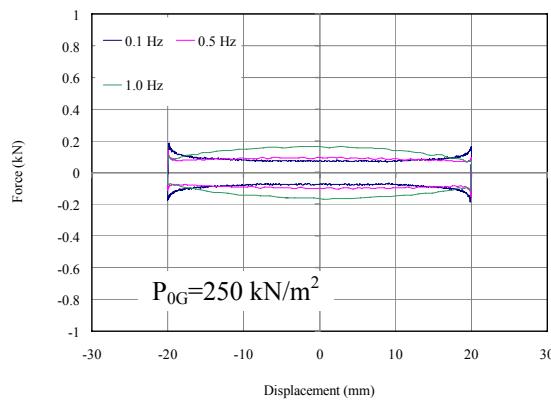
شکل ۴-۱۳- پاسخ نیرو-تغییر مکان میراگر شماره ۱ به همراه مدل خطی برای میراگر با $L_{0G}=30 \text{ mm}$ و $V_{con}=10 \text{ cm}^3$ ، تحت تغییر مکان سینوسی 10 mm با فرکانس های $1/0.5 \text{ Hz}$ ؛ (الف) در حالت شیر-بسته، (ب) در حالت شیر-باز.



شکل ۴-۱۴- پاسخ نیرو-تغییرمکان میراگر شماره ۱ به همراه مدل خطی برای میراگر با $L_{0G}=30$ mm، تحت تغییرمکان سینوسی 20 mm با فرکانس‌های 1 ، 0.5 و 0.1 Hz؛ (الف) در حالت شیر-بسته، (ب) در حالت شیر-باز.



شکل ۴-۱۵- پاسخ نیرو-تغییرمکان میراگر شماره ۱ به همراه مدل خطی برای میراگر با $L_{0G}=40$ mm، تحت تغییرمکان سینوسی $V_{con}=10 \text{ cm}^3$ و $f=0.5 \text{ Hz}$ در حالت شیر-بسته، (ب) در حالت شیر-باز.

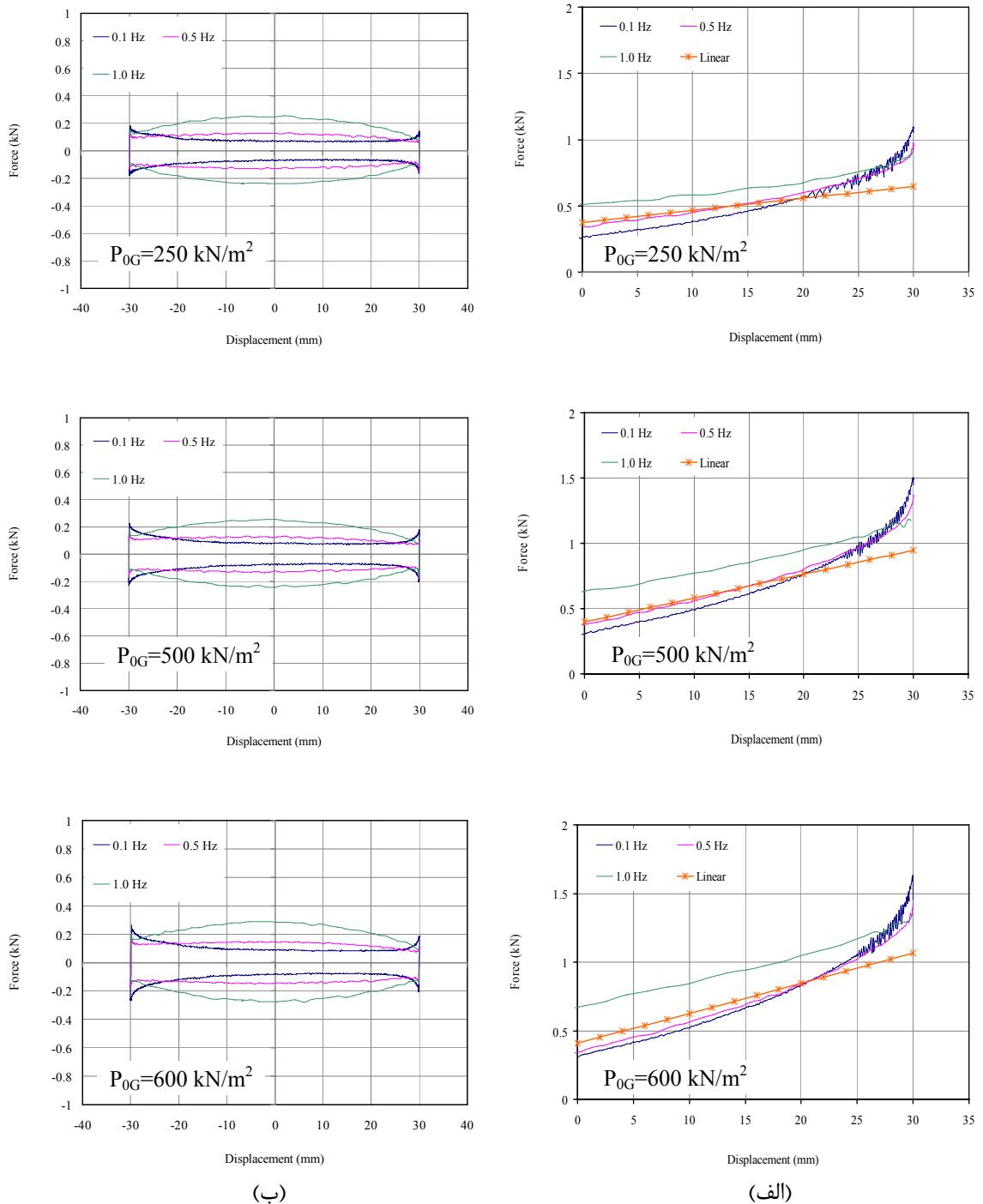


(ب)

(الف)

شکل ۱۶-۴- پاسخ نیرو-تغییرمکان میراگر شماره ۱ به همراه مدل خطی برای میراگر با $L_{0G}=40 \text{ mm}$, تحت تغییرمکان سینوسی 20 mm با فرکانس‌های $1, 0.5, 0.1 \text{ Hz}$ در حالت شیر-بسن، (ب) در حالت شیر-باز.

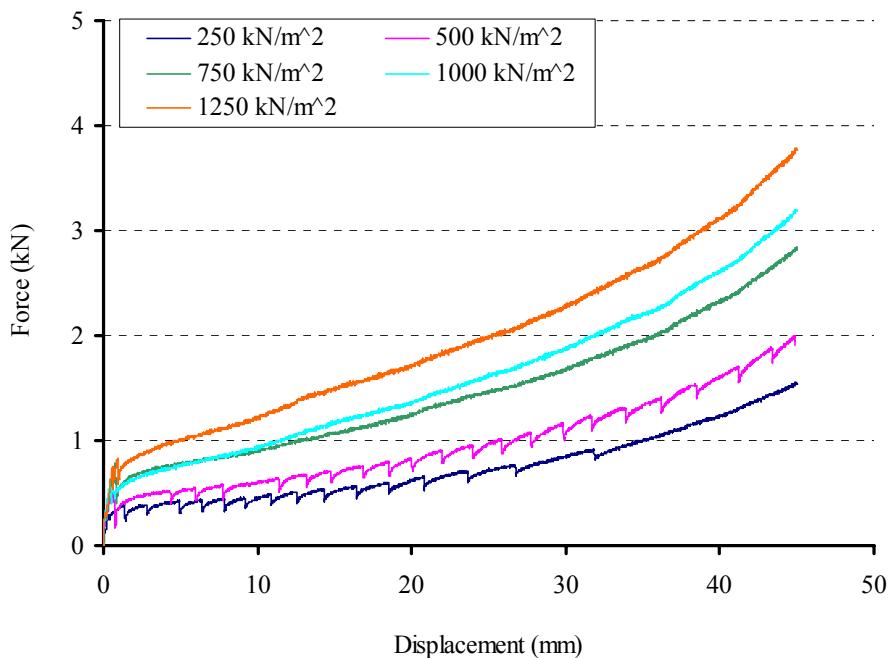
شکل ۴-۱۷ پاسخ نیرو-تغییرمکان میراگر شماره ۱ تحت فرکانس‌های مختلف برای میراگر با $L_{0G}=40$ mm تحت تغییرمکان سینوسی 30 mm را برای دو حالت شیر-بسته و شیر-باز نشان می‌دهد. نسبت دامنه به طول اولیه مخزن گاز در این تست برابر $x/L_{0G} = 75\%$ است که بزرگ‌ترین نسبت آزمایش شده در تست‌های دینامیکی است. همان طوری که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود مدل خطی نتوانسته است رفتار میراگر را به درستی پیش‌بینی نماید و سختی پیش‌بینی شده در مدل خطی کمتر از سختی واقعی میراگر است. این موضوع می‌تواند ناشی از خطی سازی و حذف جملات با مرتبه بالا در معادله (۲-۳) باشد. در واقع هنگامی که نسبت x/L_{0G} از حدی بزرگ‌تر باشد دیگر نمی‌توان از مدل خطی ارایه شده توسط معادله (۱۱-۳) برای مدل‌سازی میراگر استفاده نمود و نیاز به استفاده از مدل دقیق‌تر است. به عنوان یک نتیجه‌گیری، هنگامی که نسبت x/L_{0G} بزرگ‌تر از 66% باشد، مدل خطی نمی‌تواند رفتار میراگر را به درستی پیش‌بینی نماید. در این حالت می‌توان از مدل غیرخطی (معادله (۱۵-۳)) که دقت بالاتری دارد استفاده نمود. با توجه در شکل ۴-۱۷-ب مشاهده می‌شود که نیروی مقاوم میراگر در حالت شیر-باز برای فرکانس‌های $1/0$ و $5/0$ Hz تقریباً در تمام حالات یکسان بوده اما برای فرکانس $Hz 1$ منحنی نیرو-تغییرمکان اندکی متورم شده است. این موضوع می‌تواند ناشی از افزایش نیروی ویسکوز ناشی از حرکت روغن هیدرولیک در لوله‌های رابط باشد که با افزایش دامنه جابجایی و در فرکانس بالاتر موجب افزایش نیروی مقاوم میراگر در حالت شیر-بسته شده است.



شکل ۴-۱۷- پاسخ نیرو-تغییرمکان میراگر شماره ۱ به همراه مدل خطی برای میراگر با $L_{0G}=40 \text{ mm}$ ، تحت تغییرمکان سینوسی $V_{con}=10 \text{ cm}^3 \text{ mm}^{-3}$ با فرکانس‌های $1/\text{Hz}$ و $0.5/\text{Hz}$ (الف) در حالت شیر-بسته، (ب) در حالت شیر-باز.

۴-۳-۲- تست‌های شبه استاتیکی با دامنه جابجایی بزرگ

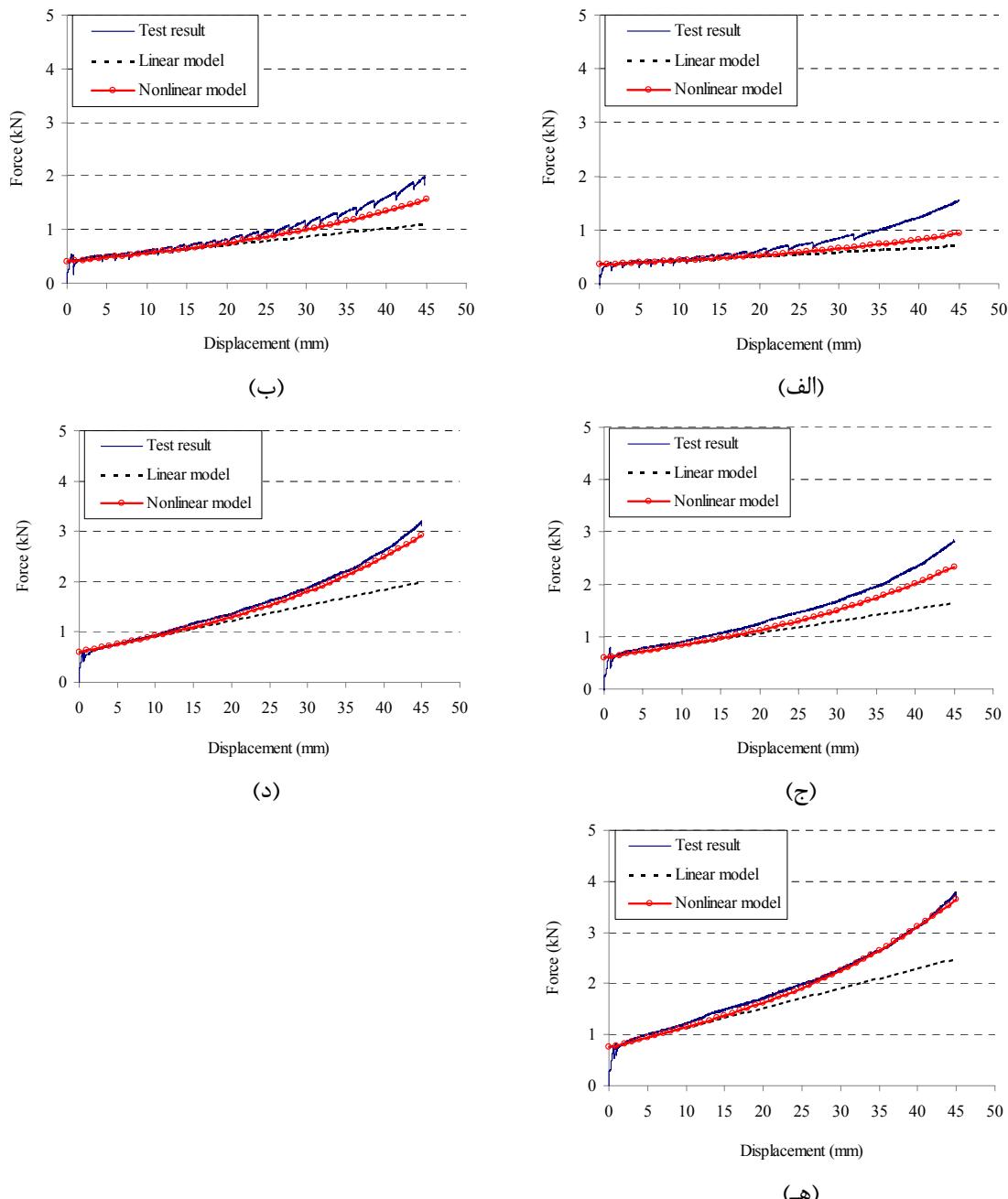
با توجه به محدودیت‌های تست دینامیکی برای اعمال تغییرمکان‌هایی با دامنه بزرگ و همچنین محدودیت استفاده از فشارهای بالاتر در مخزن گاز، یک سری تست‌های شبه استاتیکی با دامنه جابجایی بزرگ‌تر و فشار بالاتر بر روی نمونه شماره ۱ انجام شد. نتایج این تست‌ها با مدل‌های سختی خطی و غیرخطی پیشنهاد شده در بخش ۳-۳، مقایسه شد. در آزمایش‌های شبه استاتیکی طول مخزن گاز به حداقل طول قابل تنظیم در نمونه شماره ۱، یعنی $L_{0G}=50$ mm تنظیم گردید. کلیه تست‌ها با دامنه جابجایی ۴۵ mm (نسبت دامنه به طول اولیه مخزن گاز برابر $x/L_{0G} = 90\%$) و با سرعت بارگذاری 1 mm/sec انجام شد. در این تست‌ها فشار گاز مخزن در پنج سطح مختلف $p_{0G}=250, 500, 750, 1000$ و 1250 kN/m^2 تنظیم گردید. در شکل ۴-۱۸ منحنی نیرو-تغییرمکان میراگر شماره ۱ برای مقادیر مختلف p_{0G} نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۸- پاسخ نیرو-تغییرمکان میراگر شماره ۱ در تست شبه استاتیکی برای مقادیر مختلف p_{0G} و $V_{con}=10 \text{ cm}^3$ و $L_{0G}=50 \text{ mm}$

همان طوری که در شکل مشاهده می‌شود سختی میراگر و در نتیجه نیروی مقاوم آن با افزایش فشار مخزن گاز به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است و رفتار میراگر به خصوص در نواحی انتهایی گراف‌ها که نسبت x/L_{0G} بزرگ‌تر شده است از حالت خطی خارج شده است.

در شکل ۴-۱۹ نتایج تست‌های شبه استاتیکی به همراه مدل‌های پیشنهادی خطی و غیرخطی ارایه شده است. همان طوری که در شکل مشاهده می‌شود، با بزرگ‌تر شدن دامنه جابجایی پیستون، مدل خطی رفتار میراگر را به درستی پیش‌بینی نمی‌کند. با این حال، مدل غیرخطی به خوبی توانسته است رفتار میراگر را پیش‌بینی نماید.



شکل ۴-۱۹- پاسخ نیرو-تغییرمکان میراگر شماره ۱ به همراه مدل خطی و غیرخطی در تست شبه استاتیکی برای میراگر با $p_{0G}=250 \text{ kN/m}^2$ ، $V_{con}=10 \text{ cm}^3$ و $L_{0G}=50 \text{ mm}$ (الف)، (ب)، (ج)، (د)، (هـ)، (هــ) $p_{0G}=1250 \text{ kN/m}^2$ ، $p_{0G}=1000 \text{ kN/m}^2$ ، $p_{0G}=750 \text{ kN/m}^2$ ، $p_{0G}=500 \text{ kN/m}^2$

۴-۴- نمونه شماره ۲

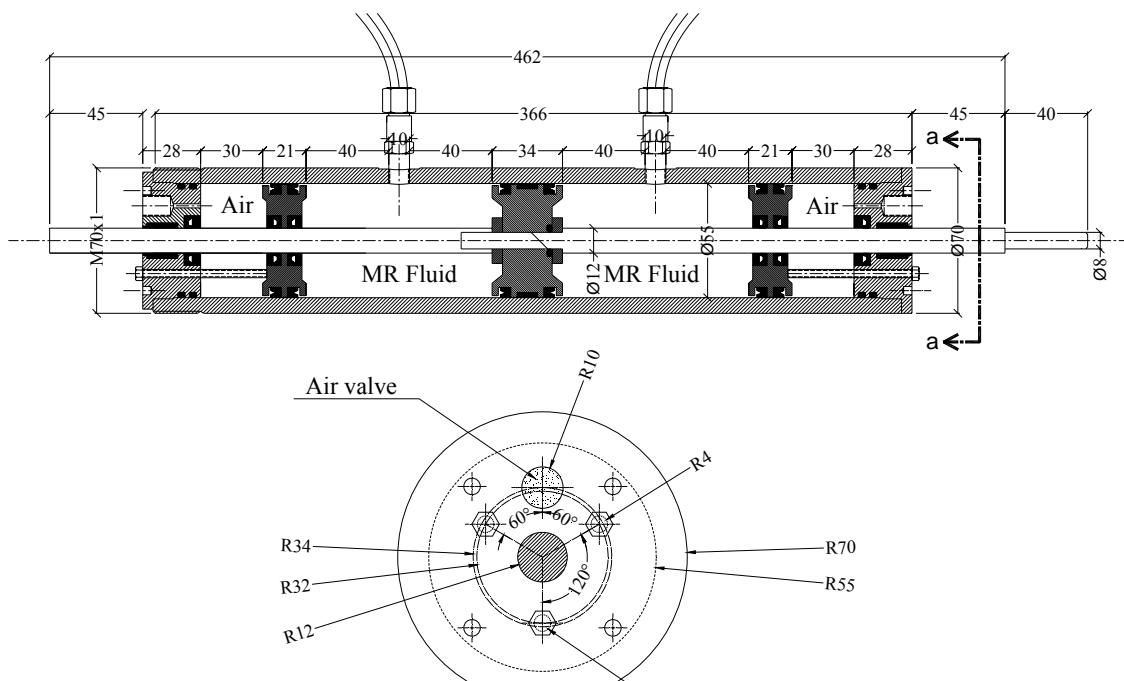
نمونه شماره ۲ مطابق با ایده اولیه میراگر MR-HSRD طراحی و ساخته شد. در این نمونه، مخازن گاز و سیال مغناطیسی در یک سیلندر واحد جانمایی شده و توسط دو عدد پیستون متحرک از یکدیگر جدا شده‌اند. دو طرف مخزن سیال مغناطیسی با استفاده از یک لوله کنارگذر که شیر مغناطیسی و شیر کنترل بر روی آن نصب شده‌اند به یکدیگر متصل می‌شود. کار ساخت نمونه در شرکت Guangzhou Ocean Hydraulic Elements Co., LTD ^{۱۶۱} واقع در شهر گوانگجو در چین انجام شده است.

۴-۱- مشخصات طراحی نمونه شماره ۲

نمونه شماره ۲ به گونه‌ای طراحی شده است که بتواند مقادیر سختی بزرگ‌تری را نسبت به نمونه شماره ۱ تأمین نماید. بدین منظور قطر داخلی سیلندر در نمونه شماره ۲ برابر $D=55\text{ mm}$ و قطر شفت برابر 12 mm در نظر گرفته شده است. حداکثر کورس پیستون و در نتیجه حداکثر طول اولیه مخزن گاز تحت فشار در نمونه شماره ۲ برابر $L_{06}=30\text{ mm}$ طراحی شده است. طراحی سیلندر به گونه‌ای انجام شده است که توانایی تحمل فشار تا 2000 kN/m^2 را به طور ایمن داشته باشد. سر سیلندرهای دو طرف سیلندر به گونه‌ای طراحی شده‌اند که در هر یک از آن‌ها یک عدد شیر یک طرفه برای تنظیم فشار گاز مخزن گاز تعییه شده است. علاوه بر این در هر سرسیلندر سه عدد پیچ تنظیم وجود دارد که طول مخزن گاز توسط آن‌ها تنظیم می‌شود. در شکل ۴-۲۰ نقشه‌های مربوط به نمونه شماره ۲ به همراه جزئیات ارایه شده است.

در شکل ۴-۲۱ تصویر شیر کنترل به کار رفته در میراگر MR-HSRD نشان داده شده است. شیر کنترل به کار رفته از نوع Moog hydraulics servo valve است که سرعت عکس العمل آن ۱۰ میلی ثانیه است. شیر کنترل در حالت نرمال (بدون اعمال جریان الکتریکی) بسته است.

^{۱۶۱} Guangzhou



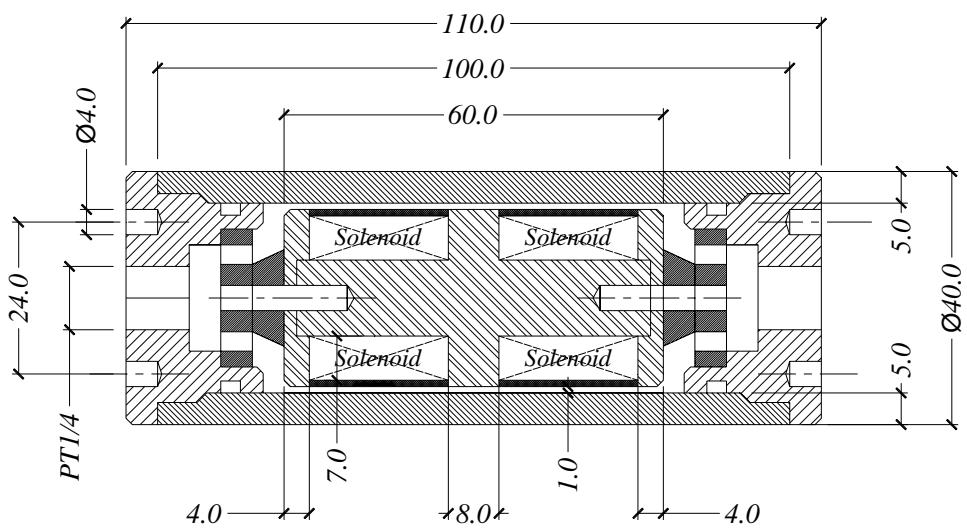
شکل ۴-۲۰- نقشه‌های مربوط به نمونه شماره ۲ (کلیه ابعاد بر حسب میلیمتر می‌باشد).



شکل ۴-۲۱- شیر کنترل به کار رفته در میراگر MR-HSRD

۴-۲-۴-۴- مشخصات طراحی شیر مغناطیسی

در بخش ۴-۲-۴ راجع به طراحی شیر مغناطیسی و پیچیدگی‌های آن بحث شد. هدف از انجام این پایان نامه طراحی و ساخت شیر مغناطیسی نمی‌باشد و تنها قرار بود از شیر مغناطیسی به عنوان اتلاف کننده انرژی در میراگر MR-HSRD استفاده شود. با توجه به این که مدت زمان زیادی از ابداع شیرهای مغناطیسی نمی‌گذرد، طراحی و ساخت این تجهیزات اغلب در فاز تحقیقاتی و مطالعاتی است. بیشتر موارد استفاده این تجهیزات در کاربردهای حساسی مثل تجهیزات نظامی و هوا فضا است. متاسفانه به همین دلیل، امکان تهیه شیر مغناطیسی از بازار فراهم نگردید و با توجه به پیچیدگی‌های طراحی و ساخت، تصمیم به ساخت یک نمونه آزمایشگاهی گرفته شد. با توجه به توضیحات ارایه شده در بخش طراحی شیر مغناطیسی، یک نمونه اولیه طراحی و به کمک شرکت Guangzhou Ocean Hydraulic Elements اقدام به ساخت آن گردید. به دلیل فراهم نبودن امکانات آزمایشگاهی برای تست مشخصات مغناطیسی مصالح مطابق آنچه در بخش ۴-۲-۴ تشریح گردید، در دانشگاه پلی تکنیک هنگ و همچنین هزینه بر بودن این نوع آزمایش‌ها در خارج از دانشگاه، مشخصات مغناطیسی مصالح مصرفی در شیر مغناطیسی با یک فرض اولیه انتخاب شدند و طراحی هندسی میراگر بر اساس همین فرضیات صورت پذیرفت. درز انتخاب شده برای شیر مغناطیسی طراحی شده برابر 2 mm در نظر گرفته شد و سایر ابعاد هندسی شیر مغناطیسی مطابق شکل ۴-۲۲ طراحی گردید. شیر مغناطیسی طراحی شده دارای دو سولنؤید است. برای بدنه سیلندر و شفت مرکزی از فولاد که رسانای مغناطیسی می‌باشد، استفاده شده است. سایر قسمت‌های شیر مغناطیسی شامل درپوش‌ها و واشرها از آلومینیوم که از لحاظ مغناطیسی نارسانا می‌باشد ساخته شده است. در شکل ۴-۲۳ تصویر قطعات تشکیل دهنده شیر مغناطیسی ساخته شده نشان داده شده است. متاسفانه به دلیل عدم تامین هزینه‌ها و همچنین فراهم نشدن ملزمات آزمایش، امکان تست نمونه شماره ۲ و شیر مغناطیسی ساخته شده در دانشگاه پلی تکنیک هنگ کنگ فراهم نگردید.



شکل ۴-۲۲- مقطع عرضی نمونه اولیه شیر مغناطیسی.



شکل ۴-۲۳- نمونه اولیه شیر مغناطیسی ساخته شده.

فصل پنجم

شبیه‌سازی عددی سیستم یک درجه
 آزاد مجهز به میراگر MR-HSRD

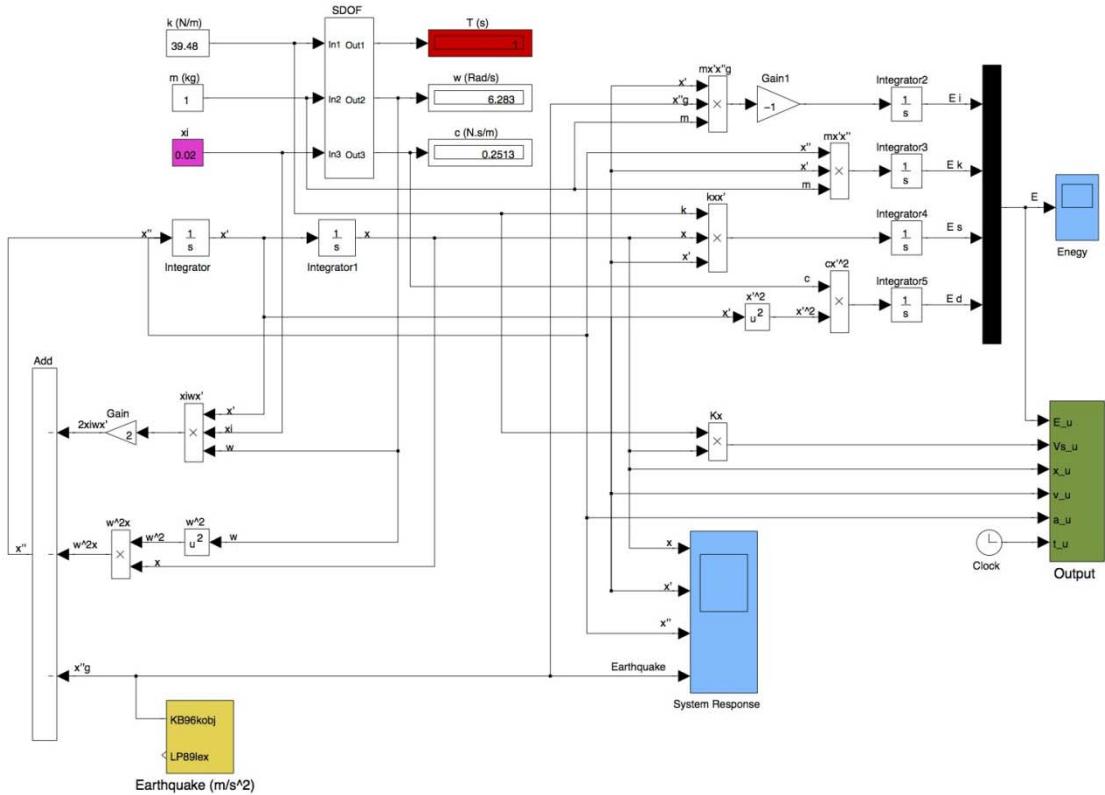
۱-۵- مقدمه

در این فصل تأثیر افزودن میراگر MR-HSRD به یک سیستم سازه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور و به جهت پیاده سازی روش‌های کنترلی ارایه شده در بخش ۳-۵، پاسخ‌های سیستم یک درجه آزاد خطی مجهز به میراگر MR-HSRD با سیستم کنترل نشده مقایسه می‌شود. بدین منظور ابتداً پاسخ ارتعاش آزاد سیستم یک درجه آزاد مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس عملکرد میراگر MR-HSRD در کاهش پاسخ سیستم یک درجه آزاد در معرض زلزله‌های حوزه نزدیک بررسی شده و اثر هر یک از روش‌های کنترل میراگر بر روی پاسخ سیستم یک درجه آزاد مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همچنانین عملکرد میراگر از دیدگاه انرژی نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. علاوه بر این تأثیر نسبت سختی میراگر بر رفتار سیستم یک درجه آزاد به عنوان یک فاکتور تأثیرگذار مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲-۵- مدل‌سازی سیستم یک درجه آزاد مجهز به میراگر MR-HSRD

سیستم یک درجه آزاد مدل‌سازی شده یک سیستم جرم-فنر-دمپر خطی با جرم 1 kg ، سختی $K=40 \text{ N/m}$ و نسبت میرایی $\zeta = 0.2$ و زمان تناوب ۱ ثانیه است که میراگر MR-HSRD به صورت یک فنر موازی با آن عمل می‌نماید. به منظور ارزیابی تأثیر سختی میراگر باز تنظیم شونده در کاهش پاسخ سیستم یک درجه آزاد، میراگرهایی با سختی مختلف به سیستم یک درجه آزاد اضافه شده و تأثیر میراگر در کاهش پاسخ سیستم یک درجه آزاد مورد بررسی قرار گرفته است. برای مدل‌سازی سیستم یک درجه آزاد از نرم افزار MATLABTM/SimulinkTM استفاده شده است. بدین منظور معادلات حرکت با استفاده از روش انتگرال‌گیری مستقیم با گام زمانی ثابت حل شده‌اند و در نهایت پاسخ سیستم یک درجه آزاد مجهز به میراگر MR-HSRD برای هر یک از روش‌های کنترل با پاسخ سیستم کنترل نشده مقایسه گردیده است. علاوه بر روش‌های کنترل تشریح شده در بخش ۳-۵، روش کنترل غیرفعال نیز برای میراگر MR-HSRD مورد بررسی قرار گرفته است. در این روش کنترلی، شیر کنترل میراگر همواره بسته است و میراگر عملاً به صورت یک فنر غیرفعال عمل می‌کند که سختی آن به سختی سیستم اضافه شده است و عملاً مکانیزمی برای اتلاف انرژی وجود ندارد. در

شکل ۵-۱ مدل سیمولینک^{۱۶۲} سیستم یک درجه آزاد فاقد میراگر MR-HSRD نشان داده شده است.

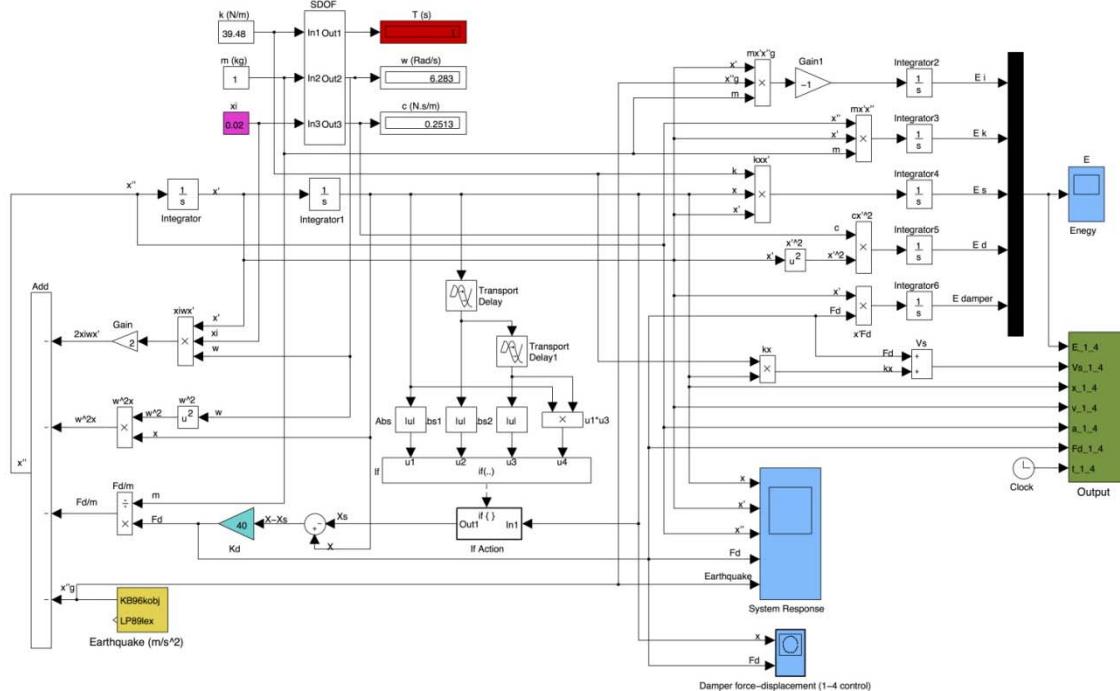


شکل ۵-۱- مدل Simulink سیستم یک درجه آزاد فاقد سیستم کنترل در محیط MATLAB

همان طوری که در بخش ۳-۵ تشریح شد، مکانیزم کنترل میراگر به گونه‌ای است که در یک سری نقاط خاص، باز یا بسته شدن شیر کنترل و مدت زمان باز یا بسته بودن، نحوه استهلاک انرژی را تعیین می‌نماید. این نقاط کنترلی در روش کنترل باز تنظیمی در واقع همان نقاط حداکثر جابجایی پیستون (و یا نقاطی که سرعت پیستون صفر است) می‌باشند که الگوریتم کنترلی سعی در شناسایی این نقاط دارد. پس از شناسایی و به طور همزمان در یک لحظه زمانی بسیار کوتاه، میراگر باز تنظیم شده و نیروی میراگر به صفر می‌رسد. این در حالی است که در روش کنترل قطع و وصل نوع ۱ و روش کنترل قطع و وصل نوع ۲، نقاط کنترلی و نحوه باز تنظیم شدن متفاوت است. در این دو روش، الگوریتم کنترلی بایستی علاوه بر شناسایی نقاط حداکثر جابجایی پیستون، توانایی تشخیص نقاطی را که در آن پیستون از یک مبدأ از پیش تنظیم شده برای جابجایی، یا همان صفر می‌گذرد را داشته

^{۱۶۲} Simulink

باشد. در این نقطه سرعت پیستون حداکثر است. بسته به این که از روش کنترل قطع و وصل نوع ۱ یا ۲ استفاده شود، فرامین برای باز یا بسته شدن شیر کنترل در نقاط کنترلی در این دو روش عکس یکدیگر است. در شکل ۵-۲ مدل سیمولینک سیستم یک درجه آزاد مجهر به میراگر MR-HSRD برای روش کنترل باز تنظیمی نشان داده شده است.

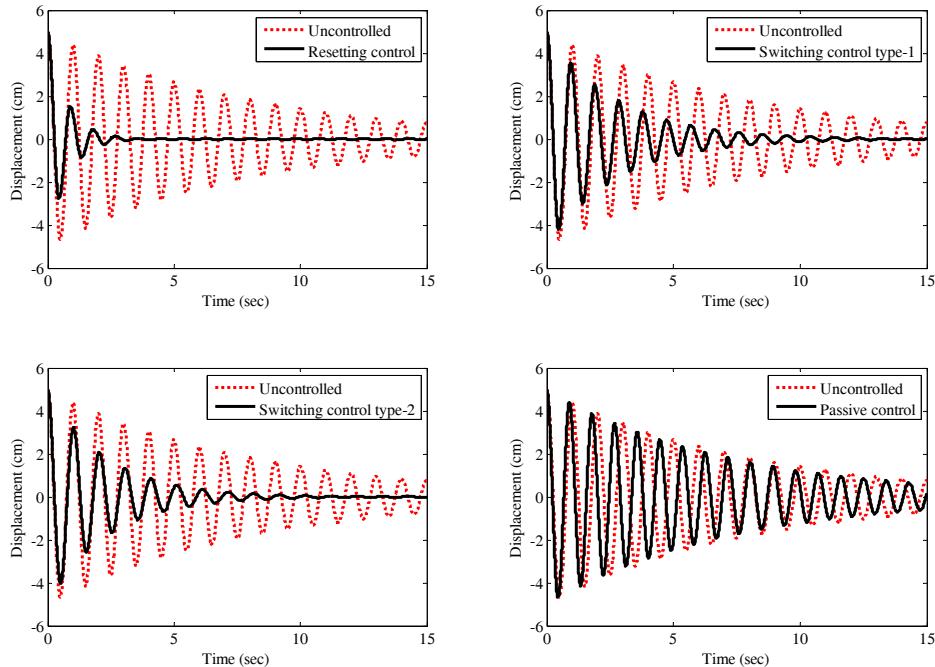


شکل ۵-۲- مدل Simulink سازه یک درجه آزاد مجهر به میراگر MR-HSRD در محیط MATLAB برای روش کنترل باز تنظیمی.

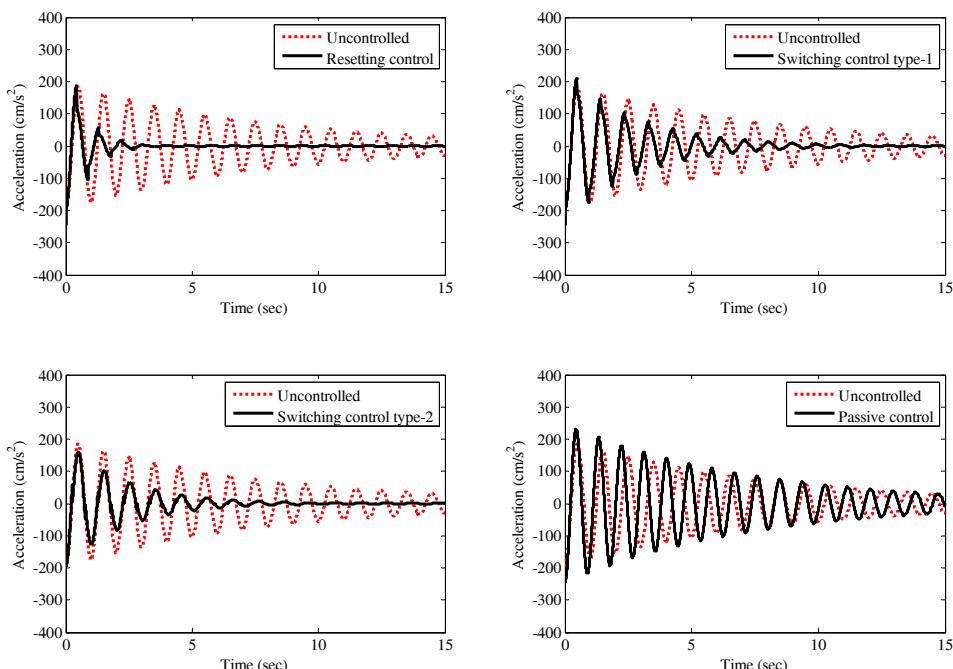
۳-۵- ارزیابی پاسخ ارتعاش آزاد سیستم یک درجه آزاد

به منظور پیاده سازی الگوریتم کنترلی و ارزیابی تأثیر سختی میراگر MR-HSRD بر نحوه عملکرد آن در کاهش پاسخ جابجایی و شتاب سیستم یک درجه آزاد، میراگر هایی با سختی معادل ٪۰.۵۰ و ٪۱۰۰ سختی اولیه سیستم یک درجه آزاد به آن اضافه شده است. سپس تغییر مکان اولیه‌ای برابر ۵ سانتیمتر به سیستم یک درجه آزاد اعمال شده و پاسخ ارتعاش آزاد آن مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۵-۳ و شکل ۵-۴ به ترتیب پاسخ زمانی جابجایی و شتاب برای روش‌های مختلف کنترلی وقتی $K_d = ۰/۲۵K$ است، ارایه شده است. همان طوری که در شکل مشاهده می‌شود روش‌های کنترلی توانسته‌اند جابجایی و شتاب سیستم را به خوبی کاهش دهند که این موضوع برای روش

کنترل باز تنظیمی مشهودتر است. هر چند روش کنترل غیرفعال تاثیری در کاهش پاسخ جابجایی نداشته است و پاسخ شتاب سیستم را نیز به طور ناچیزی افزایش داده است.



شکل ۵-۳- پاسخ زمانی جابجایی سیستم یک درجه آزادی برای $K_d = 0/25K$

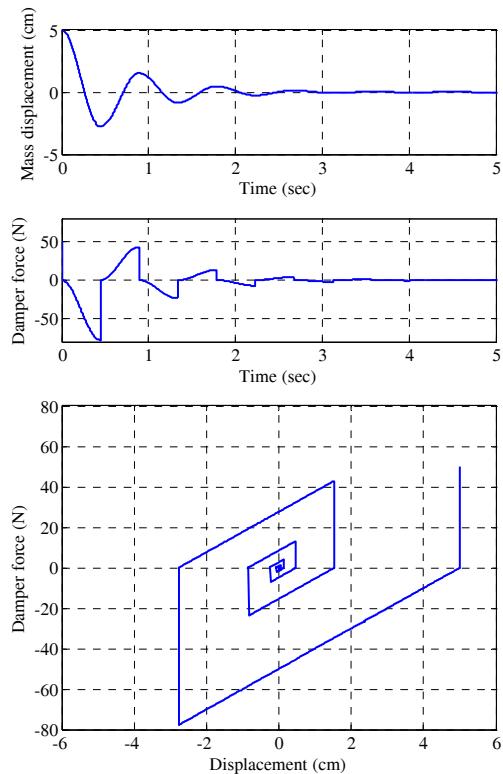


شکل ۵-۴- پاسخ زمانی شتاب سیستم یک درجه آزادی برای $K_d = 0/25K$

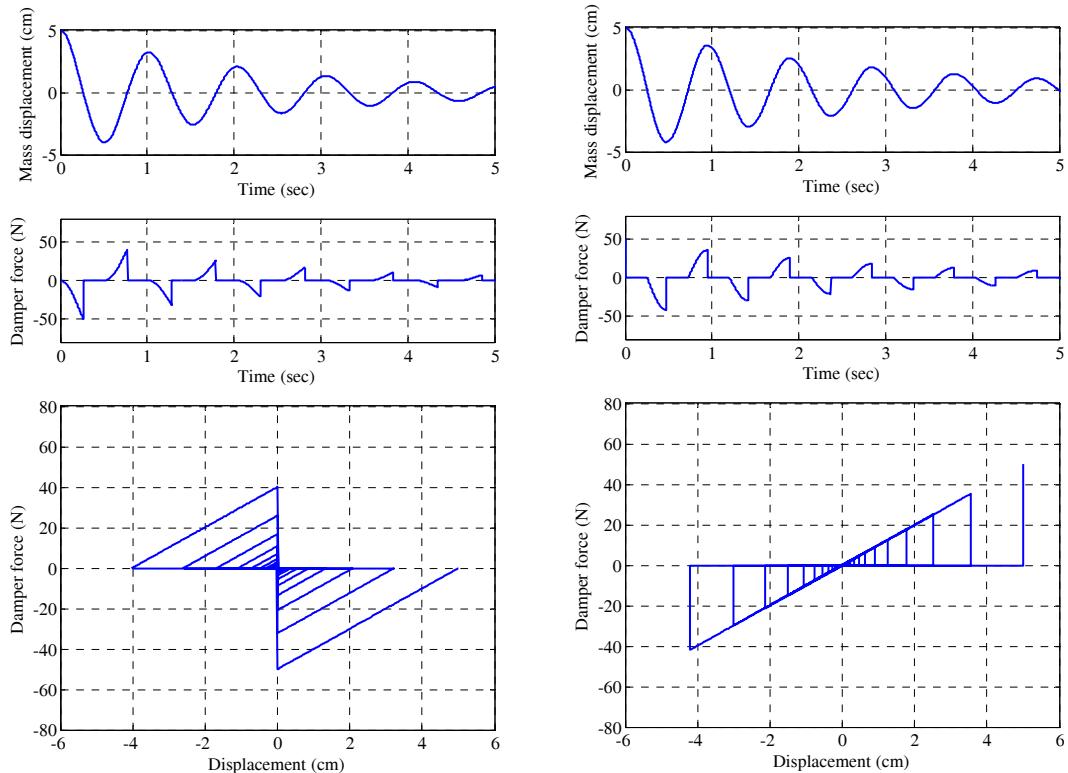
شکل ۵-۵ پاسخ میراگر باز تنظیم شونده برای روش‌های مختلف کنترل وقتی $K_d=0/25K$ است را نشان می‌دهد. با دقت در پاسخ زمانی جابجایی و پاسخ زمانی نیرو در هر یک روش‌های کنترل، مشاهده می‌شود که الگوریتم کنترلی به خوبی توانسته است نقاط باز تنظیم شدن را تشخیص دهد و منحنی نیرو-تغییرمکان میراگر دقیقاً مطابق رفتار تعریف شده در هر یک از روش‌های کنترلی است. علاوه بر این همان طوری که انتظار می‌رفت، روش کنترل باز تنظیمی بیشترین میزان اتلاف انرژی را در بین روش‌های کنترلی داشته و دامنه جابجایی در این روش بسیار سریع‌تر از سایر روش‌های کنترلی کاهش یافته و به صفر رسیده است. به طوری که میراگر عملأً پس از ۵ بار باز تنظیم شدن، انرژی ورودی به سیستم را کاملاً مستهلك کرده است.

در شکل ۵-۶ پاسخ زمانی جابجایی برای روش‌های مختلف کنترلی وقتی $K_d=0/5K$ است، نشان داده شده است. همان طوری که در شکل مشاهده می‌شود با دو برابر شدن سختی میراگر نسبت به حالت قبل، به جز روش کنترل غیرفعال، در سایر روش‌های کنترل دامنه جابجایی کوچک‌تر شده است ضمن آن که جابجایی سیستم با تعداد نوسانات کمتری به صفر رسیده است. به طوری که در روش کنترل باز تنظیمی سیستم عملأً پس از یک سیکل متوقف شده است.

شکل ۵-۷ پاسخ زمانی شتاب سیستم را برای روش‌های مختلف کنترلی وقتی $K_d=0/5K$ است، نشان می‌دهد. در حالی که روش کنترل غیرفعال باعث افزایش شتاب شده است، سایر روش‌های کنترلی به خوبی توانسته‌اند شتاب سیستم یک درجه آزاد را کاهش دهند. بهترین عملکرد مربوط به روش کنترل باز تنظیمی است و پس از آن به ترتیب روش کنترل قطع و وصل نوع ۲ و روش کنترل قطع و وصل نوع ۱ بهترین عملکرد را در کاهش پاسخ شتاب داشته‌اند.



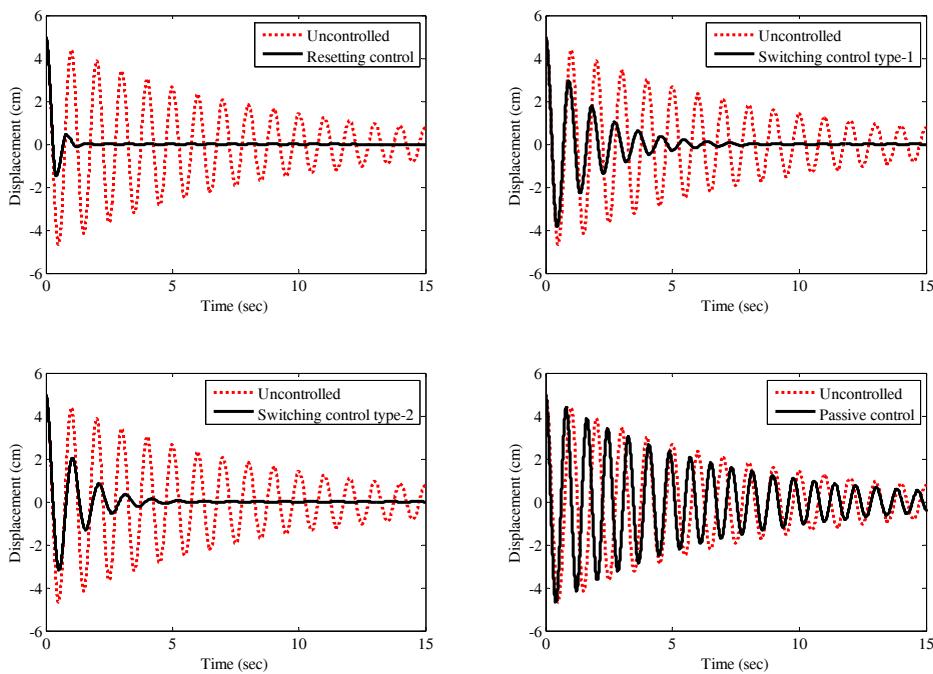
(الف)



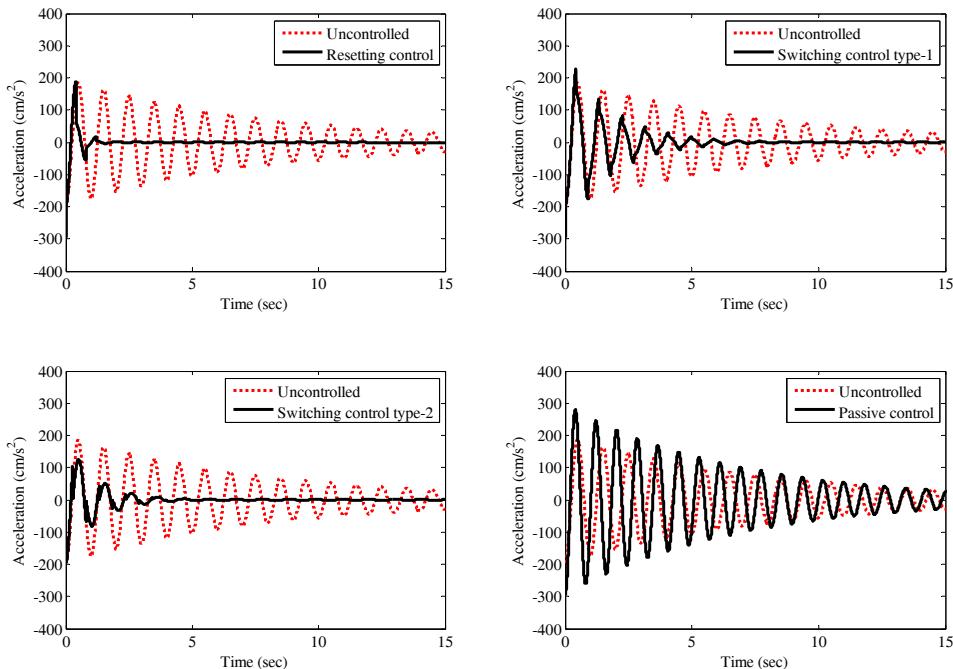
(ج)

(ب)

شکل ۵-۵- پاسخ زمانی جابجایی جرم و نیروی میراگر و منحنی نیرو- تغییرمکان برای $K_d = 0.25K$
 (الف) روش کنترل باز تنظیمی، (ب) روش کنترل قطع و وصل نوع ۱، (ج) روش کنترل قطع و وصل نوع ۲.



شکل ۵-۶- پاسخ زمانی جابجایی سیستم یک درجه آزادی برای $K_d=0.5K$

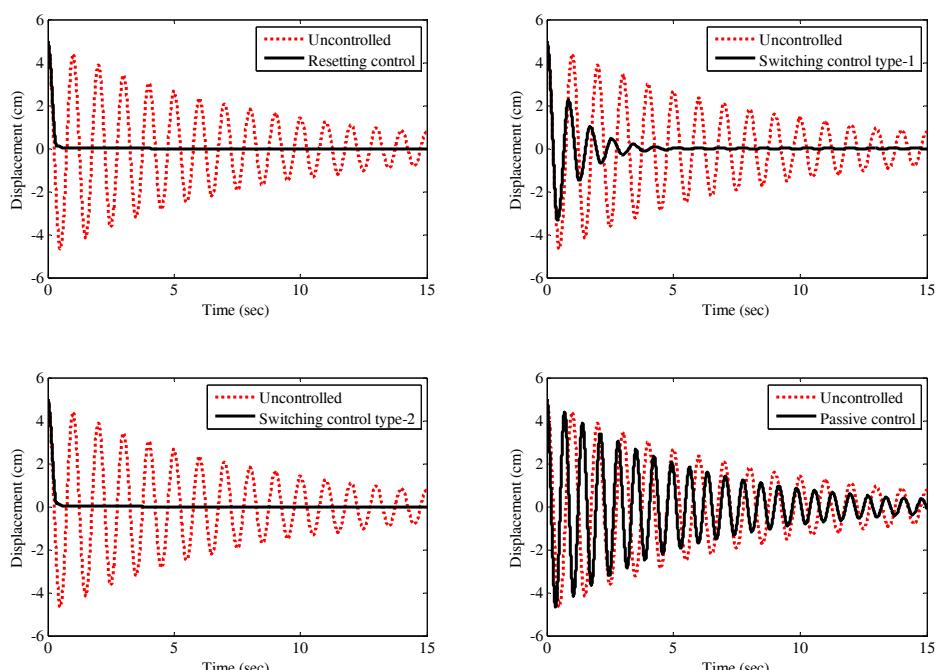


شکل ۵-۷- پاسخ زمانی شتاب سیستم یک درجه آزادی برای $K_d=0.5K$

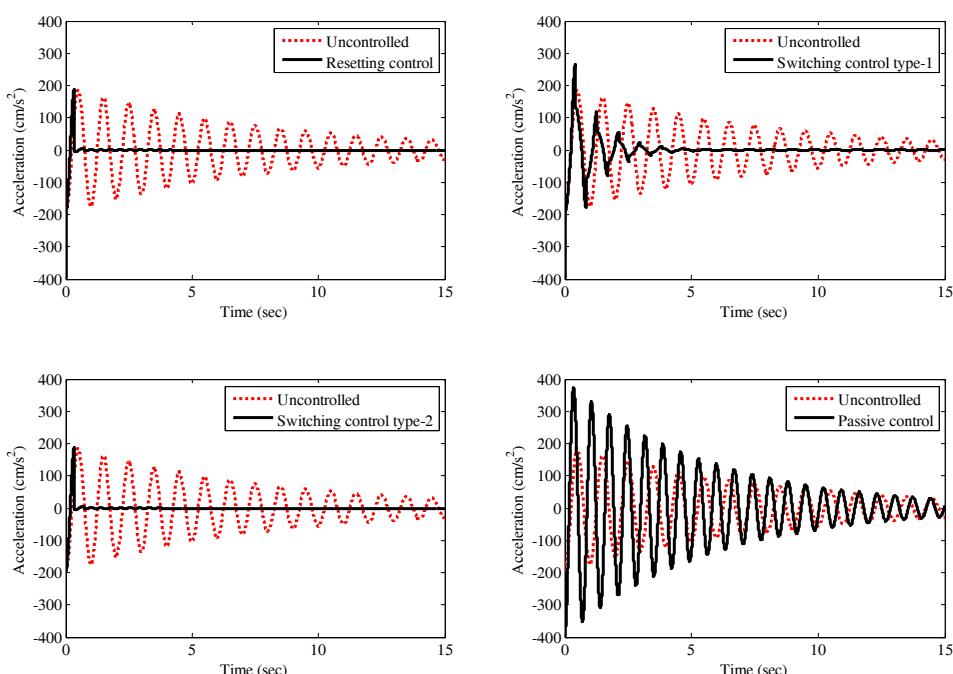
در شکل ۵-۸ پاسخ زمانی جابجایی برای روش‌های مختلف کنترلی وقتی $K_d=K$ است، ارایه شده است. همان طوری که در شکل مشاهده می‌شود روش کنترل غیرفعال باعث کاهش جزئی جابجایی شده است ولی سایر روش‌های کنترل جایجایی را به طور چشمگیری کاهش داده‌اند. به

طوری که در روش کنترل باز تنظیمی و روش کنترل قطع و وصل نوع ۲ سیستم عملاً بدون آن که ارتعاش کند متوقف شده است و کل انرژی ورودی به سیستم در همان ابتدا و با یک بار باز تنظیم شدن میراگر تلف شده است. این موضوع در شکل ۵-۹ در مورد پاسخ شتاب نیز مشاهده می‌شود.

هرچند روش کنترل غیرفعال شتاب سیستم را به طور قابل توجهی افزایش داده است.



شکل ۵-۸- پاسخ زمانی جابجایی سیستم یک درجه آزادی برای $K_d=K$



شکل ۵-۹- پاسخ زمانی شتاب سیستم یک درجه آزادی برای $K_d=K$

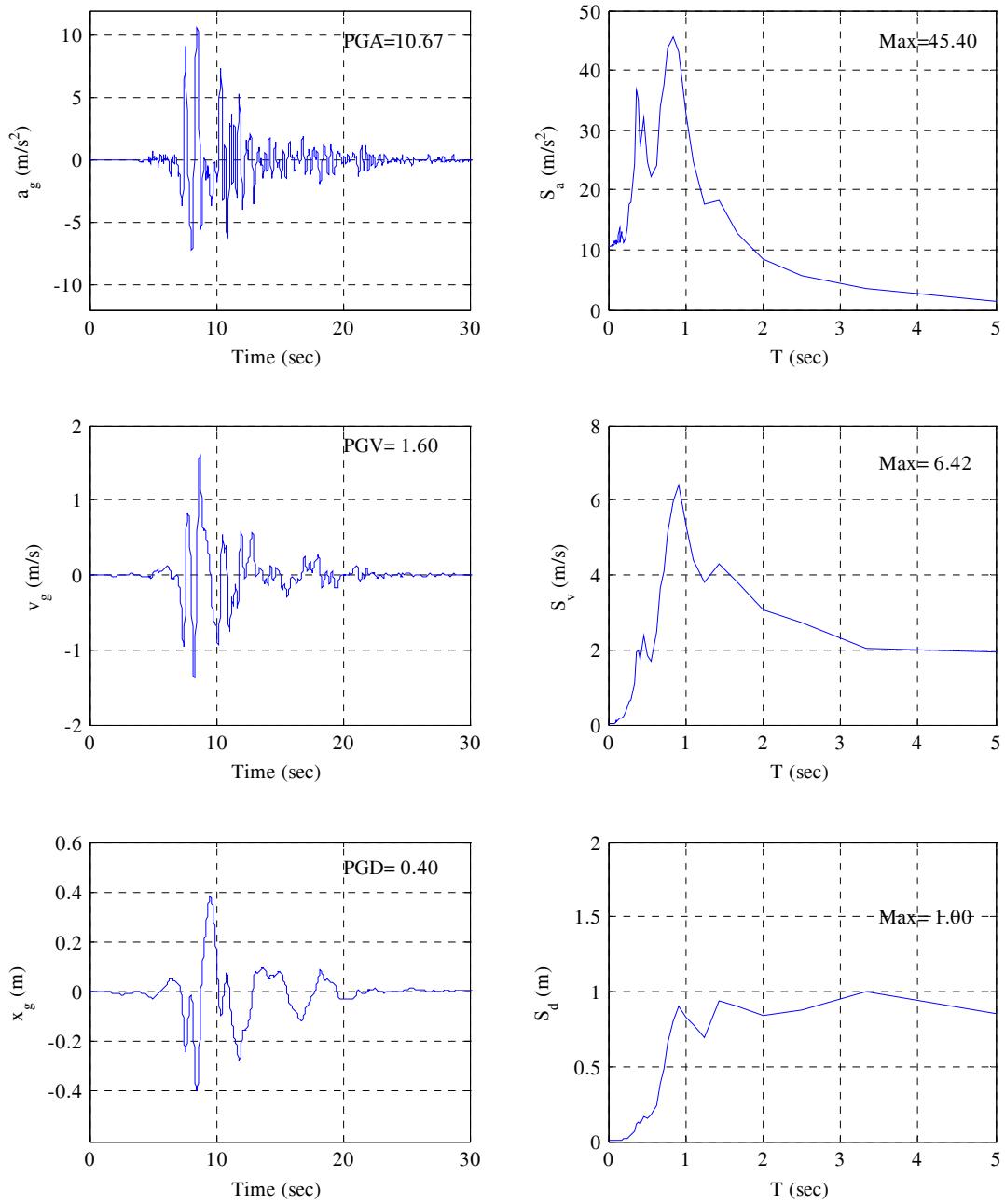
۴-۵- ارزیابی پاسخ سیستم یک درجه آزاد تحت زلزله حوزه نزدیک

در این بخش به منظور بررسی تأثیر میراگرهای MR-HSRD بر عملکرد سازه‌های در معرض زلزله‌های حوزه نزدیک، پاسخ سیستم یک درجه آزاد مجهز به این میراگرها تحت زلزله‌های حوزه نزدیک کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA و لوماپریتا^{۱۶۳} (۱۹۸۹) ایستگاه سد لگزینگتون^{۱۶۴} مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور میراگرهایی با سختی معادل ۰.۵٪ و ۱.۰٪ سختی سیستم به آن اضافه شده و تأثیر آن در کاهش پاسخ تغییرمکان، شتاب و برش پایه سیستم یک درجه آزاد مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین پاسخ میراگر برای هر یک از روش‌های مختلف کنترل ارایه شده است. علاوه بر این به منظور بررسی عملکرد میراگر از نقطه نظر انرژی، پاسخ زمانی انرژی کل سیستم برای روش‌های کنترلی مختلف ارایه شده است. در نهایت پاسخ زمانی انرژی موجود در سیستم که حاصل جمع انرژی جنبشی و پتانسیل سیستم در هر لحظه است، به عنوان یک معیار سنجش برای برآورده میزان انرژی باقیمانده در سیستم، ارایه شده است.

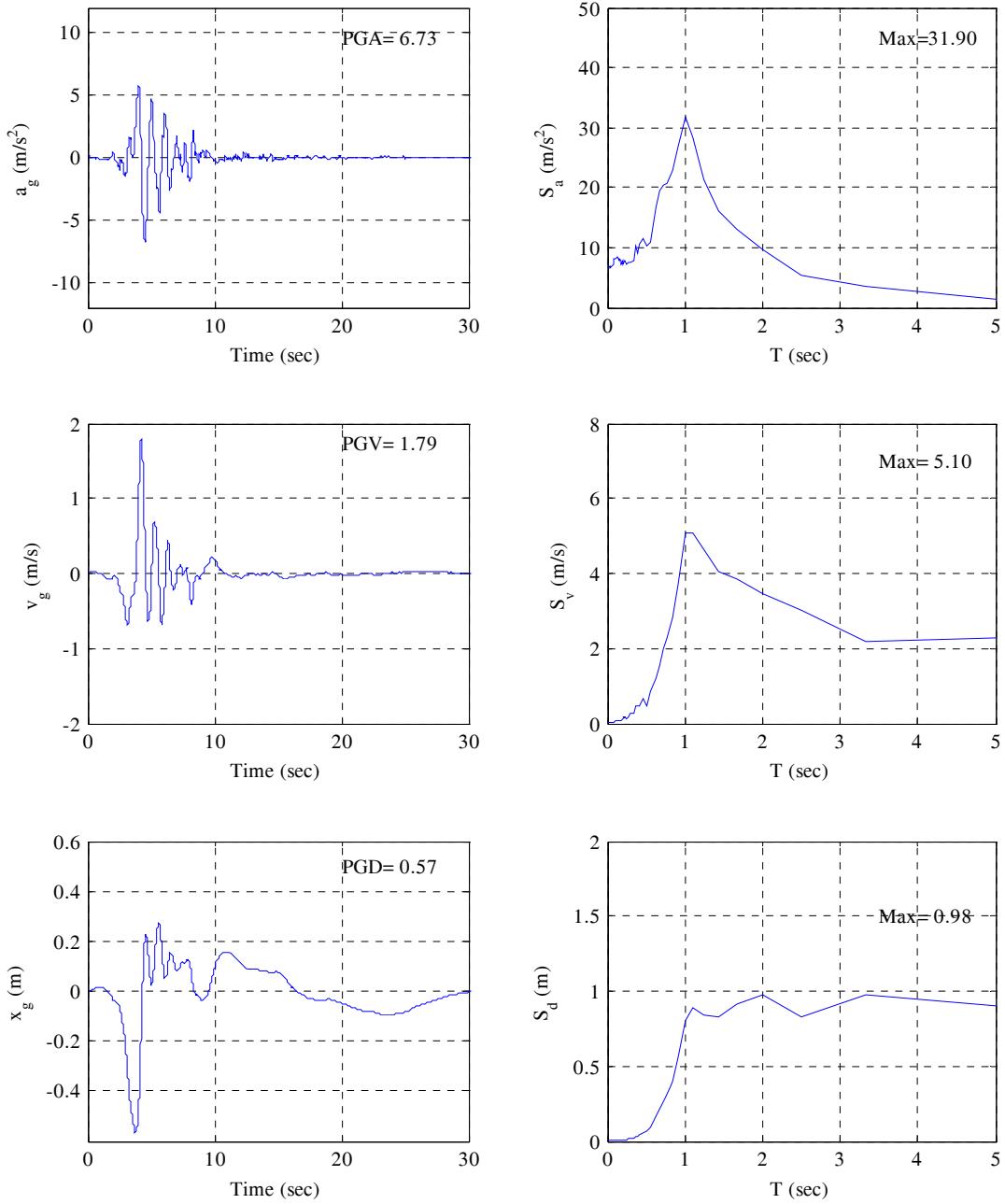
تاریخچه زمانی و طیف پاسخ شتاب، سرعت و جابجایی با میرایی ۲٪^{۱۶۵} برای زلزله‌های کوبه (ایستگاه JMA) و لوماپریتا (ایستگاه سد لگزینگتون) به ترتیب در شکل ۵-۱۰ و شکل ۵-۱۱ ارایه گردیده است.

^{۱۶۳} Loma Prieta

^{۱۶۴} Lexington Dam



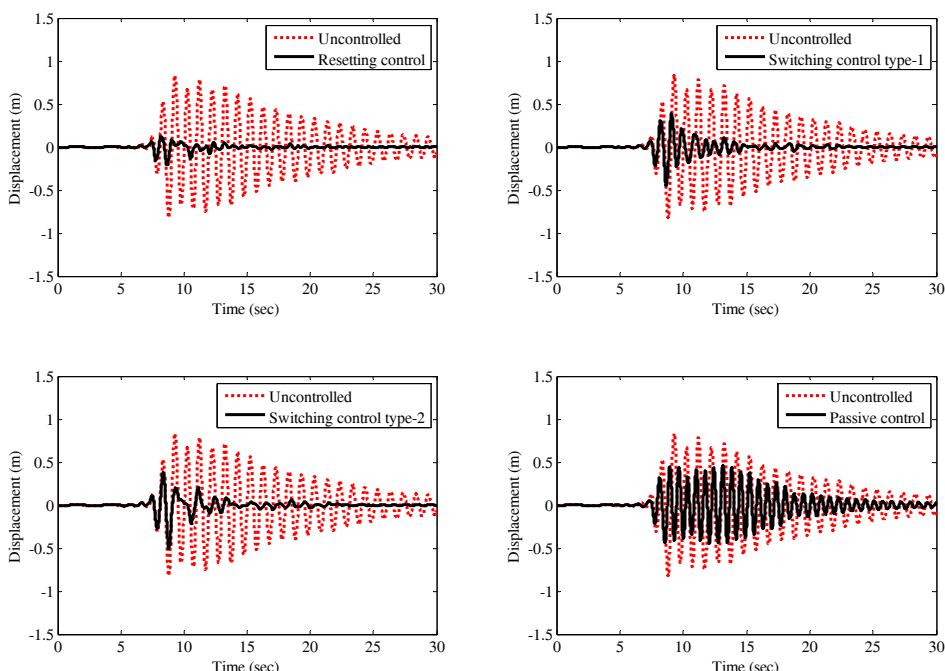
شکل ۵-۱۰- تاریخچه زمانی و طیف پاسخ شتاب، سرعت و جابجایی زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA با میرایی ۲٪.



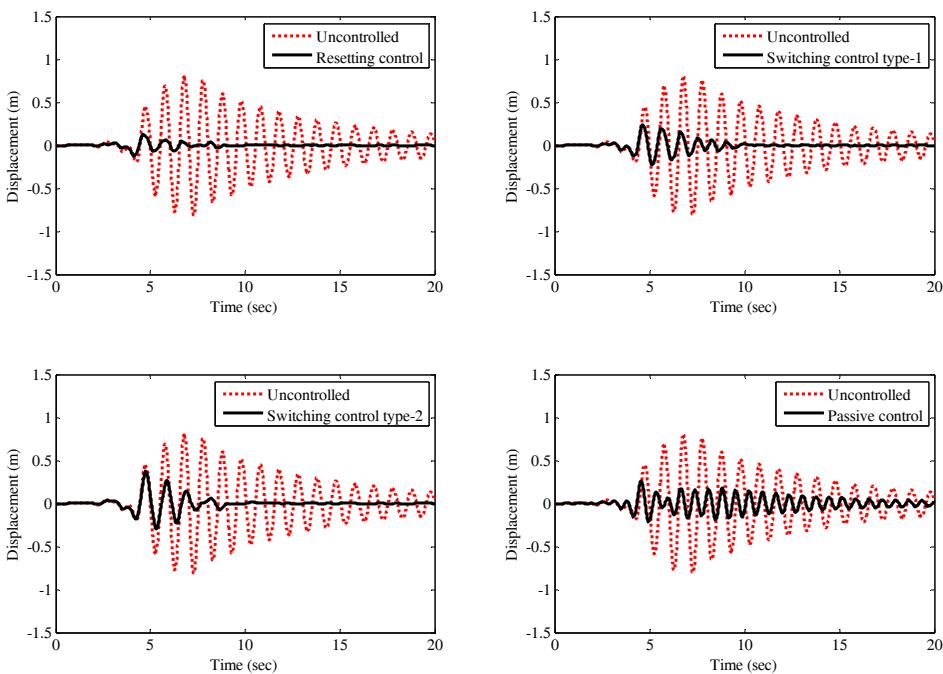
شکل ۵-۱۱- تاریخچه زمانی و طیف پاسخ شتاب، سرعت و جابجایی زلزله لوماپریتا (۱۹۸۹) ایستگاه سد لگزینگتون با میرایی ۰٪.

۱-۴-۵- پاسخ جابجایی

در این بخش پاسخ جابجایی سیستم یک درجه آزاد مجهز به میراگر MR-HSRD مورد بررسی قرار می‌گیرد. پاسخ زمانی جابجایی سیستم یک درجه آزادی برای روش‌های مختلف کنترل میراگر وقتی $K_d = K$ است، تحت زلزله‌های کوبه (ایستگاه JMA) و لوماپریتا (ایستگاه سد لگزینگتون) به ترتیب در شکل ۵-۱۲ و شکل ۵-۱۳ نشان داده شده است. همان طوری که در شکل‌ها مشاهده می‌شود تمام روش‌های کنترل تحت هر دو زلزله مطالعه شده توانسته‌اند دامنه جابجایی سیستم یک درجه آزاد را به طور موثری کاهش دهند.



شکل ۵-۱۲- پاسخ زمانی جابجایی سیستم یک درجه آزادی برای روش‌های مختلف کنترل میراگر تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA وقتی $K_d = K$



شکل ۵-۱۳- پاسخ زمانی جابجایی سیستم یک درجه آزادی برای روش‌های مختلف کنترل میراگر تحت زلزله لوماپریتا (۱۹۸۹) ایستگاه سد لگزینگتون وقتی $K_d=K$

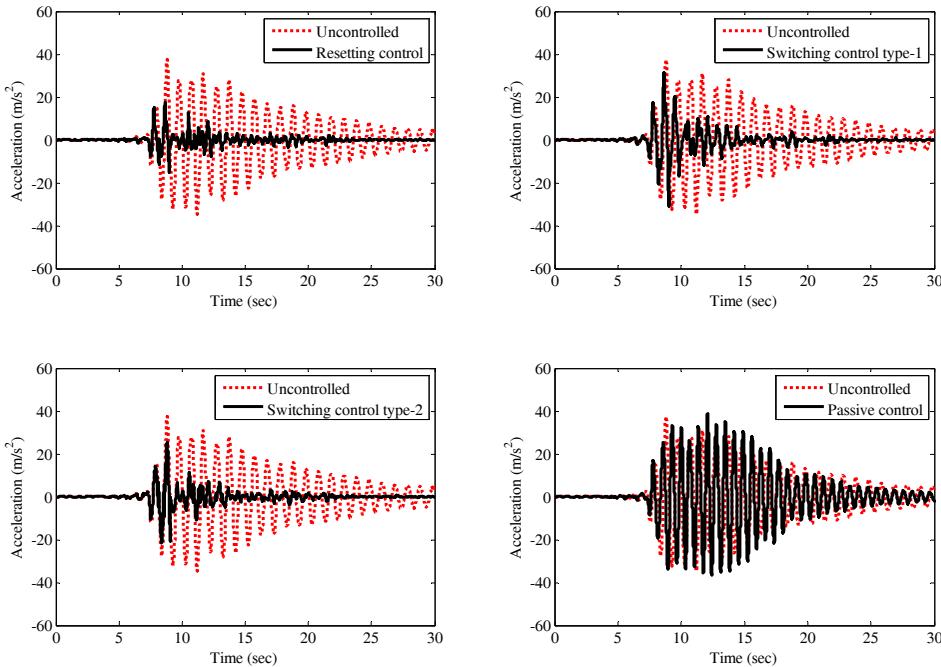
۲-۴-۵- پاسخ شتاب

مقایسه پاسخ شتاب سیستم یک درجه آزاد مجهز به میراگر MR-HSRD در شکل ۵-۱۴ و شکل ۵-۱۵ نشان می‌دهد که به جز روش کنترل غیرفعال که اندکی شتاب سیستم را تحت زلزله کوبه (ایستگاه JMA) افزایش داده است، سایر روش‌های کنترل توانسته‌اند شتاب سیستم را به خوبی کاهش دهند. این کاهش پاسخ شتاب در روش کنترل باز تنظیمی بیشتر است.

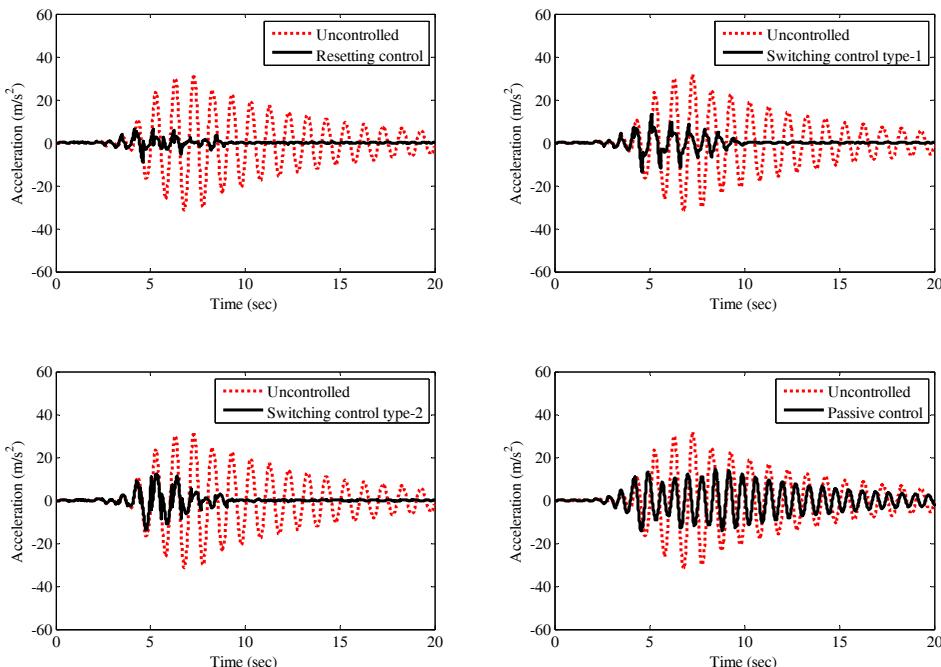
۳-۴-۵- برش پایه

نمودار برش پایه سیستم یک درجه آزاد برای روش‌های مختلف کنترل به اضافه سیستم کنترل نشده تحت زلزله‌های مطالعه شده در شکل ۵-۱۶ و شکل ۵-۱۷ ارایه شده است. همان طوری که مشاهده می‌شود وقتی نسبت سختی میراگر به سختی سیستم $K_d/K=1$ است، روش کنترل باز تنظیمی و روش کنترل قطع و وصل نوع ۲ تحت هر دو زلزله توانسته‌اند برش پایه سیستم را در حدود ۴۰٪ تا

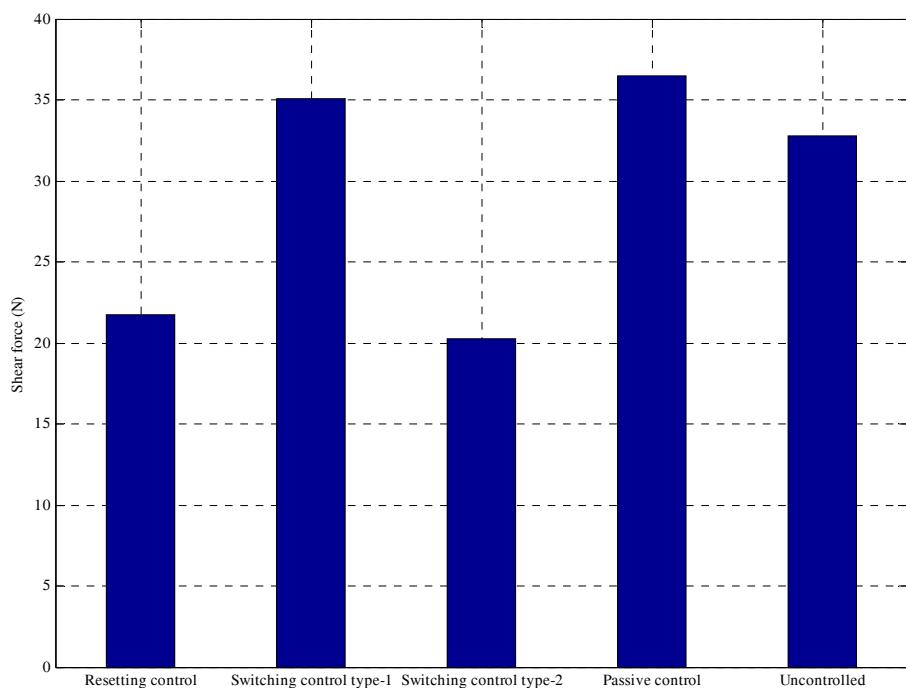
۵۰٪ کاهش دهنده این در حالیست که در زلزله کوبه (ایستگاه JMA) روش کنترل غیرفعال و روش کنترل قطع و وصل نوع ۱ باعث افزایش جزئی برش پایه شده‌اند.



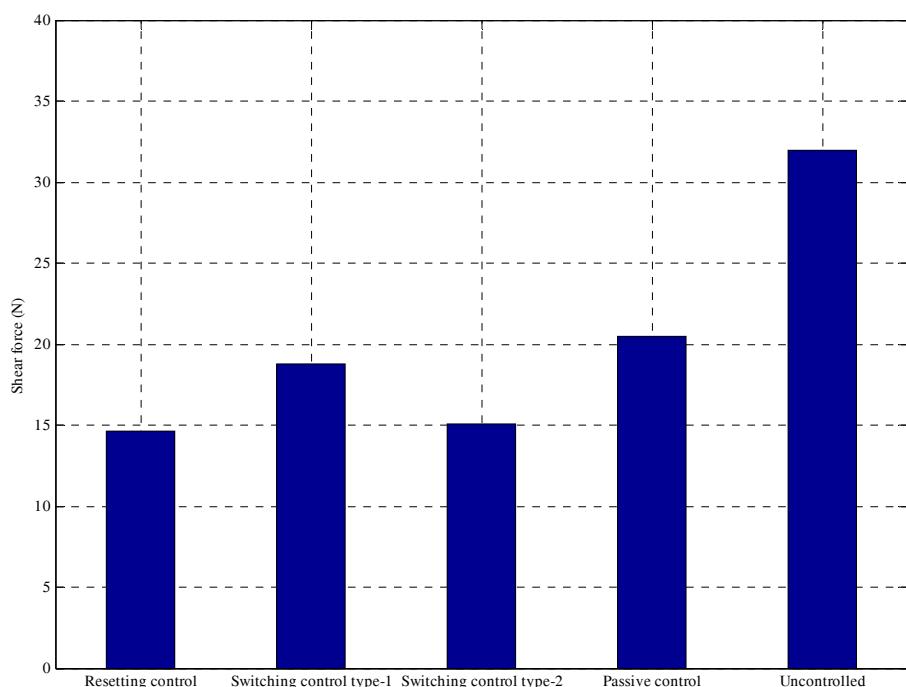
شکل ۵-۱۴- پاسخ زمانی شتاب سیستم یک درجه آزادی برای روش‌های مختلف کنترل میراگر تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA وقتی $K_d = K$



شکل ۵-۱۵- پاسخ زمانی شتاب سیستم یک درجه آزادی برای روش‌های مختلف کنترل میراگر تحت زلزله لوماپریتا (۱۹۸۹) ایستگاه سد لگزینگتون وقتی $K_d = K$



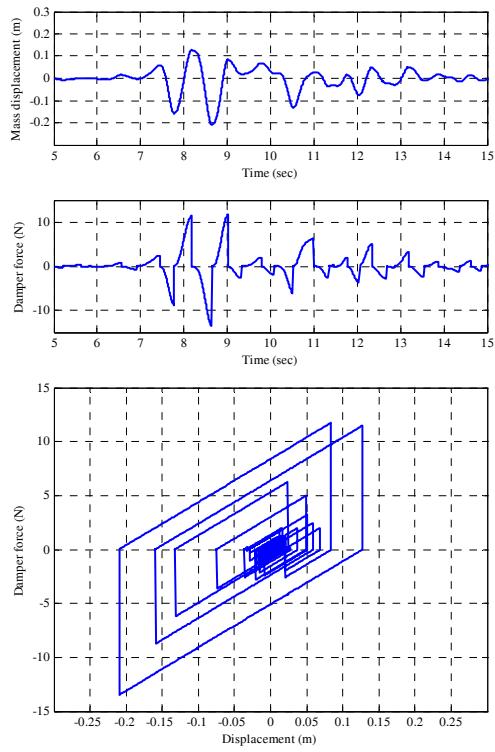
شکل ۵-۱۶- برش پایه سیستم یک درجه آزاد تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA وقتی $K_d = K$



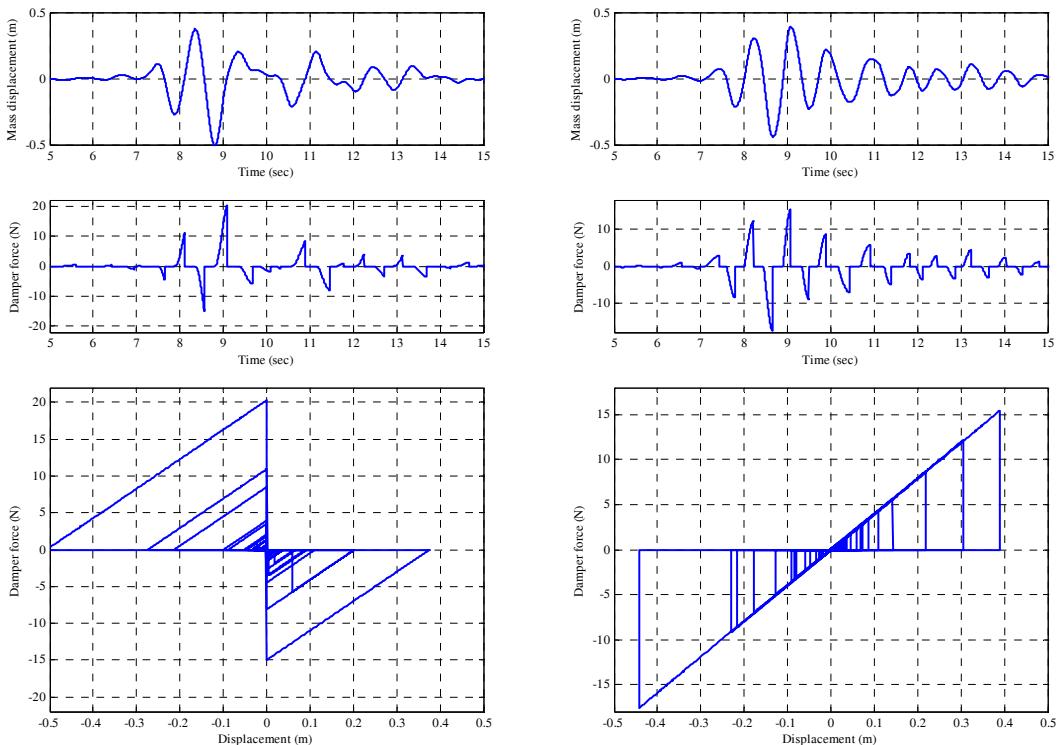
شکل ۵-۱۷- برش پایه سیستم یک درجه آزاد تحت زلزله لوماپریتا (۱۹۸۹) ایستگاه سد لگزینگتون وقتی $K_d = K$

۴-۵- نیروی میراگر

منحنی نیرو-تغییرمکان میراگر به همراه پاسخ زمانی نیرو و جابجایی پیستون میراگر در شکل ۵-۱۸ و شکل ۵-۱۹ به ترتیب برای زلزله‌های کوبه (ایستگاه JMA) و لوماپریتا (ایستگاه سد لگزینگتون) نشان داده شده است. همان طوری که در شکل مشاهده می‌شود میراگر توانسته است مطابق روش کنترلی تعریف شده عمل نماید. با دقت در پاسخ زمانی نیرو و جابجایی پیستون میراگر مشاهده می‌شود که میراگر دقیقاً در نقاط پیش‌بینی شده باز تنظیم شده است (نیروی میراگر در یک لحظه زمانی به صفر رسیده است) و الگوریتم کنترلی به کار رفته توانسته است نقاط کنترلی را به خوبی شناسایی نماید. با مقایسه چرخه‌های هیسترزیس نیرو-تغییرمکان میراگر در روش‌های مختلف کنترل، همان طوری که از قبل هم پیش‌بینی می‌شد، در روش کنترل باز تنظیمی مساحت محصور در حلقه‌های هیسترزیس که بیانگر میزان انرژی تلف شده می‌باشد، بیشتر از سایر روش‌های کنترل است.



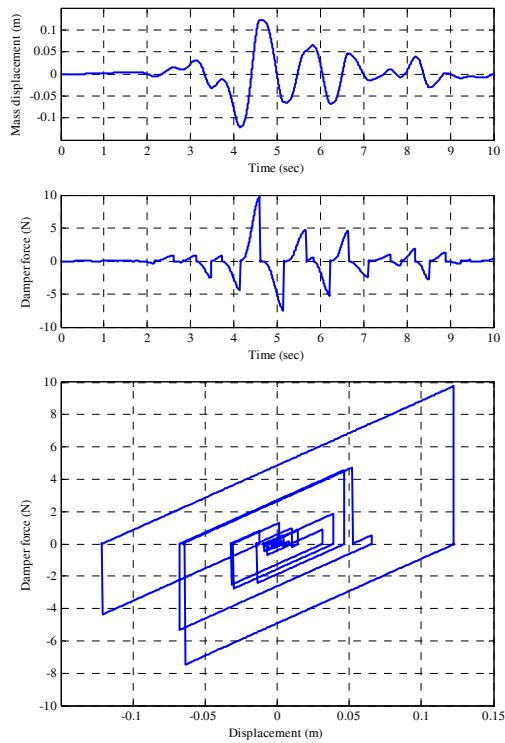
(الف)



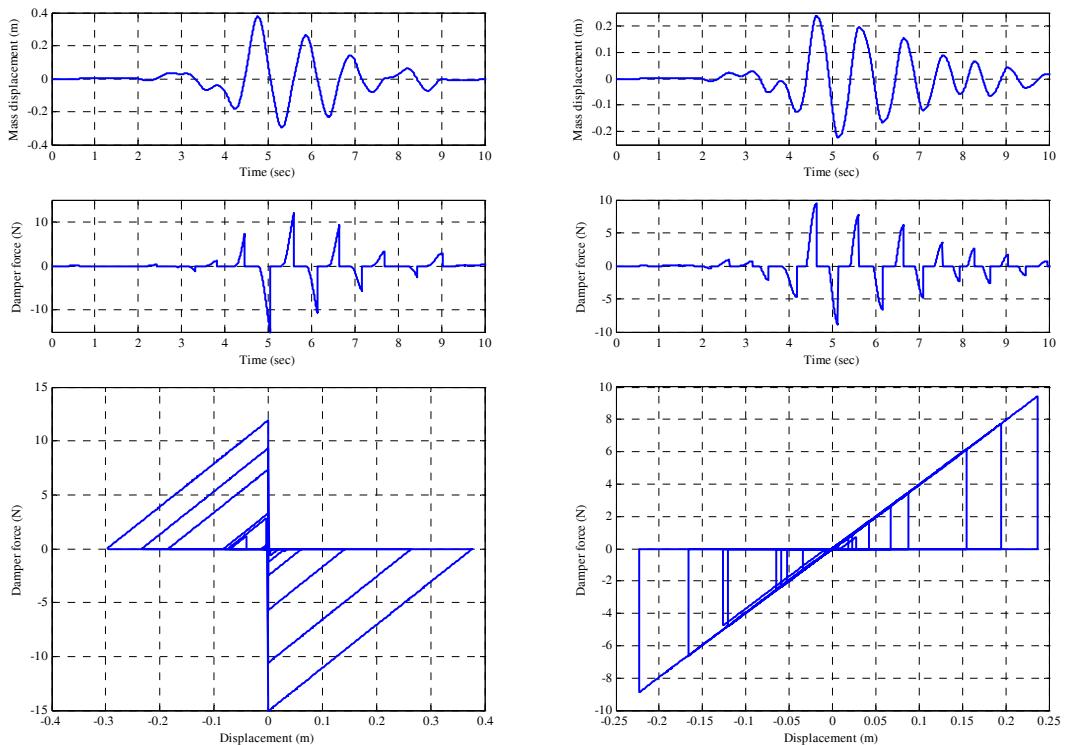
(ب)

(ج)

شکل ۵-۱۸- پاسخ زمانی جابجایی نسبی، نیروی میراگر و منحنی نیرو-تغییرمکان میراگر تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA وقتی $K_d = K$: (الف) روش کنترل باز تنظیمی، (ب) روش کنترل قطع و وصل نوع ۱، (ج) روش کنترل قطع و وصل نوع ۲.



(الف)



(ج)

(ب)

شکل ۵-۱۹- پاسخ زمانی جابجایی نسبی، نیروی میراگر و منحنی نیرو-تغییرمکان میراگر تحت زلزله

لوماپریتا (۱۹۸۹) ایستگاه سد لگزینگتون وقتی $K_d = K$; (الف) روش کنترل باز تنظیمی، (ب) روش

کنترل قطع و وصل نوع ۱، (ج) روش کنترل قطع و وصل نوع ۲.

۴-۵-۵- پاسخ‌های حداکثر سیستم یک درجه آزاد

پاسخ‌های حداکثر سیستم یک درجه آزاد تحت زلزله‌های حوزه نزدیک مطالعه شده در جدول ۱-۵ ارایه شده است. همان طوری که در این جدول مشاهده می‌شود تحت دو زلزله حوزه نزدیک بررسی شده، میراگر MR-HSRC توانسته است تقریباً تمام پاسخ‌های حداکثر سیستم یک درجه آزاد را به طور موثری کاهش دهد. میزان کاهش پاسخ نسبت مستقیمی با افزایش نسبت K_d/K داشته است. تنها در روش کنترل غیرفعال و تحت زلزله کوبه (ایستگاه JMA) اندکی شتاب مطلق و شتاب RMS سیستم افزایش داشته است. در میان روش‌های کنترل به کار رفته در این مطالعه، بهترین عملکرد مربوط به روش کنترل باز تنظیمی است.

جدول ۱-۵- پاسخ‌های حداکثر سازه یک درجه آزاد

Earthquake	Control method	x_{\max} (m)	$\frac{x_{\max}^{\text{con}}}{x_{\max}^{\text{unc}}}$	a_{\max} (m/s^2)	$\frac{a_{\max}^{\text{con}}}{a_{\max}^{\text{unc}}}$	a_{RMS} (m/s^2)	$\frac{a_{\text{RMS}}^{\text{con}}}{a_{\text{RMS}}^{\text{unc}}}$	$V_{b\max}$ (N)	$\frac{V_{b\max}^{\text{con}}}{V_{b\max}^{\text{unc}}}$	$F_{d\max}$ (N)
$K_d=0.5K$										
Kobe, 1995 (JMA)	Resetting control	0.35	0.43	23.6	0.63	3.0	0.26	26.1	0.80	12.1
	Switching control type-1	0.61	0.74	36.4	0.97	5.8	0.51	36.4	1.11	12.2
	Switching control type-2	0.65	0.78	30.9	0.83	4.5	0.39	25.6	0.78	13.0
	Passive control	0.77	0.92	45.7	1.22	12.6	1.09	45.6	1.39	15.3
	Uncontrolled	0.83	---	37.4	---	11.5	---	32.8	---	0.0
$K_d=K$										
Kobe, 1995 (JMA)	Resetting control	0.21	0.25	17.3	0.46	2.2	0.19	21.7	0.66	13.5
	Switching control type-1	0.44	0.53	31.3	0.84	4.2	0.37	35.0	1.07	17.6
	Switching control type-2	0.51	0.61	25.3	0.68	3.5	0.30	20.2	0.62	20.3
	Passive control	0.46	0.55	38.7	1.04	12.7	1.10	36.5	1.11	18.4
	Uncontrolled	0.83	---	37.4	---	11.5	---	32.8	---	0.0
$K_d=0.5K$										
Loma Prieta, 1989 (Lexington Dam)	Resetting control	0.23	0.28	12.4	0.39	1.9	0.16	16.7	0.52	7.7
	Switching control type-1	0.34	0.42	16.6	0.53	4.0	0.35	20.4	0.64	6.9
	Switching control type-2	0.46	0.57	18.6	0.59	4.4	0.39	18.1	0.57	9.2
	Passive control	0.37	0.46	19.1	0.60	5.0	0.45	21.9	0.69	7.4
	Uncontrolled	0.81	---	31.7	---	11.3	---	32.0	---	0.0
$K_d=K$										
Loma Prieta, 1989 (Lexington Dam)	Resetting control	0.12	0.15	9.0	0.28	1.3	0.11	14.6	0.46	9.8
	Switching control type-1	0.24	0.29	13.7	0.43	2.6	0.23	18.7	0.59	9.4
	Switching control type-2	0.38	0.47	13.8	0.44	2.8	0.25	15.1	0.47	15.1
	Passive control	0.26	0.32	14.8	0.47	5.8	0.51	20.5	0.64	10.3
	Uncontrolled	0.81	---	31.7	---	11.3	---	32.0	---	0.0

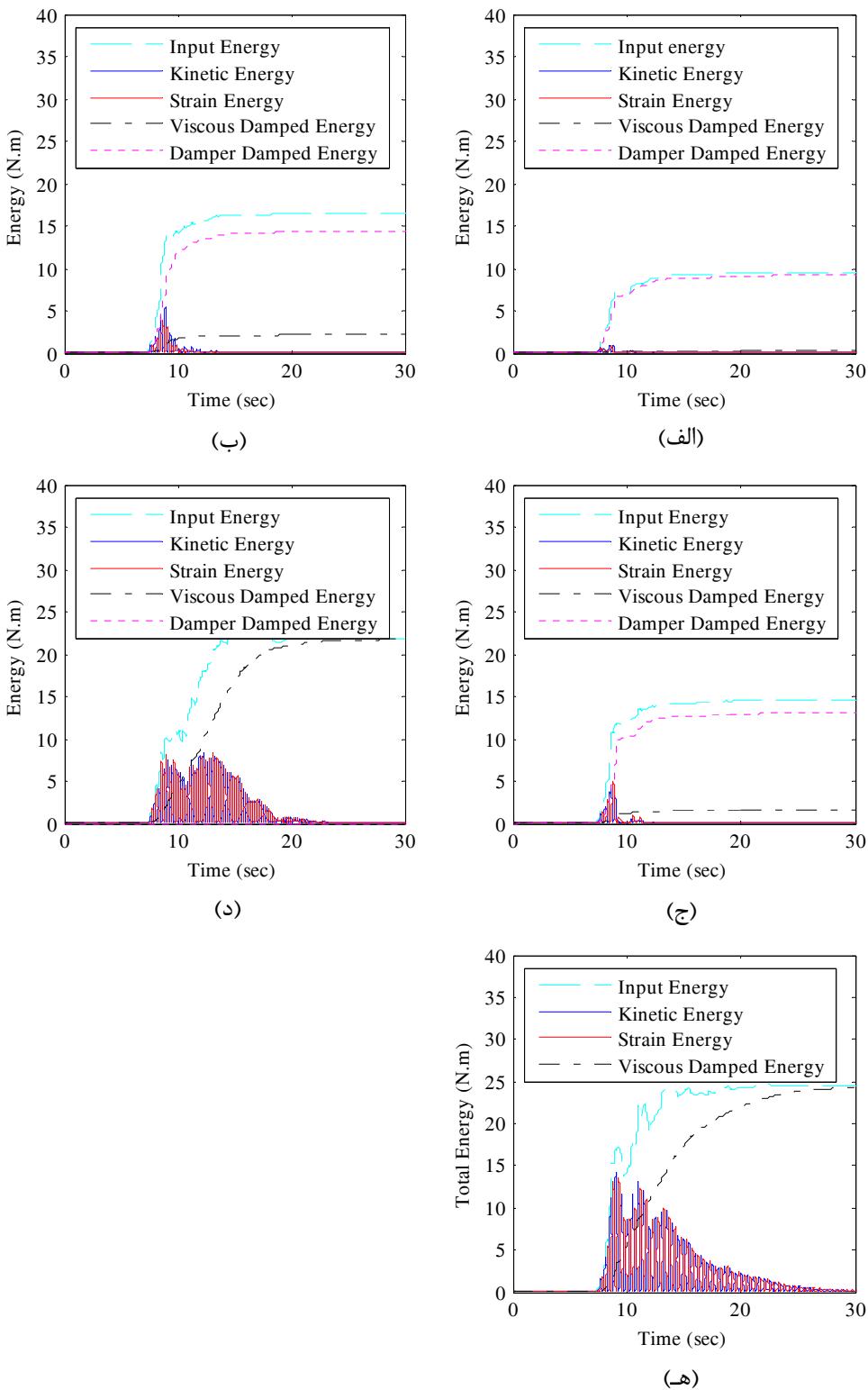
۴-۶- انرژی کل سیستم

به منظور بررسی عملکرد میراگر MR-HSRD از دیدگاه انرژی، پاسخ زمانی انرژی سیستم (شامل انرژی ورودی، انرژی جنبشی، انرژی پتانسیل، انرژی تلف شده توسط میرایی ویسکوز و انرژی تلف شده توسط میراگر MR-HSRD) در شکل ۵-۲۰ و شکل ۵-۲۱ برای زلزله‌های مطالعه شده ارایه شده است. میزان انرژی ورودی به سیستم در هر لحظه برابر مجموع انرژی جنبشی، انرژی پتانسیل و انرژی‌های تلف شده به واسطه مکانیزم‌های موجود در سیستم است. در سیستم‌های کنترل نشده، انرژی ورودی به سیستم در عمل باقیستی با استفاده از یک سری مکانیزم‌ها که معمولاً به واسطه تغییرشکل‌های غیرالاستیک در المان‌های سازه‌ای و غیر سازه‌ای به وجود می‌آید، تلف شود. بسته به وسعت تغییر شکل‌ها، ممکن است اینمی و یا عملکرد سازه پس از وقوع زلزله دچار مشکل شود و عملاً امکان استفاده از سازه وجود نداشته باشد. کاهش میزان انرژی ورودی به سیستم همواره به عنوان یکی از راهکارهای مقابله با زلزله مطرح است. به گونه‌ای که اکثر سیستم‌های نوین مقابله با زلزله سعی در کاهش میزان انرژی ورودی به سیستم و یا انتقال اتلاف انرژی از المان‌های سازه‌ای به تجهیزات غیر سازه‌ای دارند تا این که در خلال زلزله، اجزای سازه‌ای کمترین آسیب ممکن را متحمل شوند. با توجه به این که در این تحقیق رفتار سازه به صورت الاستیک خطی مدل شده است، لذا اثر تغییرشکل‌های غیرالاستیک اجزا در نظر گرفته نشده است. اما به عنوان یک معیار سنجش، میزان انرژی ویسکوز تلف شده می‌تواند برای سنجش نیاز اتلاف انرژی در سیستم سازه‌ای در نظر گرفته شود.

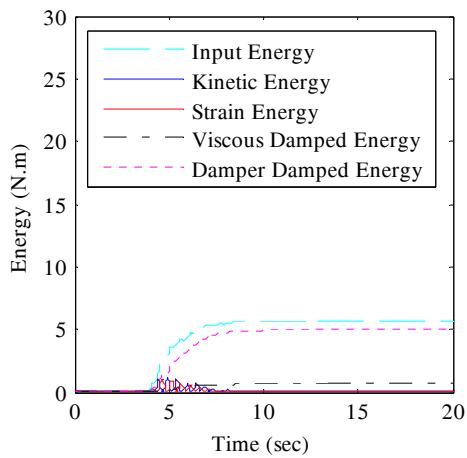
با توجه به شکل ۵-۲۰-الف، ب و ج مشاهده می‌شود که تحت زلزله کوبه (ایستگاه JMA)، میزان انرژی ورودی به سیستم در روش‌های کنترل باز تنظیمی، کنترل قطع و وصل نوع ۱ و کنترل قطع و وصل نوع ۲، به خوبی کاهش یافته است که این موضوع می‌تواند تقاضای اتلاف انرژی در سیستم را کاهش دهد. ضمن آن که عمدۀ انرژی ورودی به سیستم توسط میراگر تلف شده است و سهم انرژی تلف شده توسط مکانیزم میرایی ویسکوز در مقایسه با روش کنترل غیرفعال و سیستم کنترل نشده بسیار کم شده است. همان طوری که در شکل ۵-۲۰-د مشاهده می‌شود، در روش کنترل غیرفعال میزان انرژی ورودی به سیستم و همچنین انرژی تلف شده به واسطه مکانیزم ویسکوز

در سازه نسبت به سازه کنترل نشده اندکی افزایش داشته است که نشان دهنده عملکرد نامناسب این روش کنترلی از نقطه نظر انرژی است.

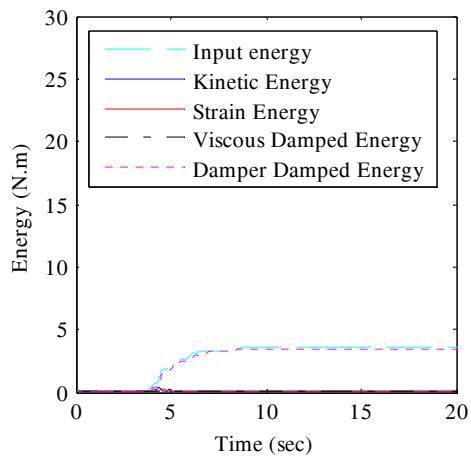
با دقت در شکل ۵-۲۱ مشاهده می‌شود که میزان انرژی ورودی به سیستم در تمام روش‌های کنترلی به خوبی کاهش یافته است. به طوری که در روش کنترل باز تنظیمی و کنترل قطع و وصل نوع ۱ میزان انرژی ورودی در حدود ۷۵٪ کاهش یافته است. در شکل ۵-۵-۵ که مربوط به روش کنترل غیرفعال است نیز کاهش قابل ملاحظه‌ای در میزان انرژی ورودی مشاهده می‌شود. این موضوع می‌تواند ناشی از انتقال فرکانسی به سمت شتاب‌های پایین‌تر طیف زلزله باشد. استفاده از روش کنترل غیرفعال با نسبت $K_d/K_c = 1$ باعث کاهش زمان تناوب سازه یک درجه آزاد از ۱ ثانیه به ۰/۷ ثانیه می‌شود. با دقت در طیف پاسخ شتاب زلزله لوماپریتا (ایستگاه سد لگزینگتون) در شکل ۵-۱۱ مشاهده می‌شود که میزان شتاب اعمال شده به سازه‌ای با زمان تناوب ۰/۷ ثانیه تحت این زلزله به مراتب کمتر از سازه‌ای با زمان تناوب ۱ ثانیه است که این موضوع باعث کاهش انرژی ورودی به سیستم یک درجه آزاد در این زلزله خاص شده است. با این حال به دلیل عدم وجود مکانیزم اتلاف انرژی در روش کنترل غیرفعال، عمدۀ انرژی ورودی به سیستم در این روش بایستی توسط مکانیزم میرایی ویسکوز تلف شود که می‌تواند باعث آسیب‌های سازه‌ای و غیر سازه‌ای شود.



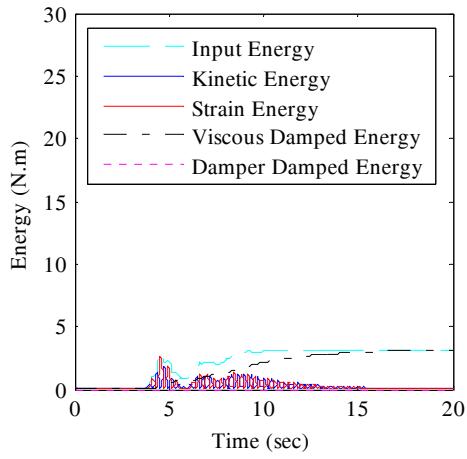
شکل ۵ - ۲۰ - پاسخ زمانی انرژی کل سیستم یک درجه آزاد تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA وقتی $K_d = K$; (الف) روش کنترل باز تنظیمی، (ب) روش کنترل قطع و وصل نوع ۱، (ج) روش کنترل قطع و وصل نوع ۲، (د) روش کنترل غیرفعال، (ه) کنترل نشده.



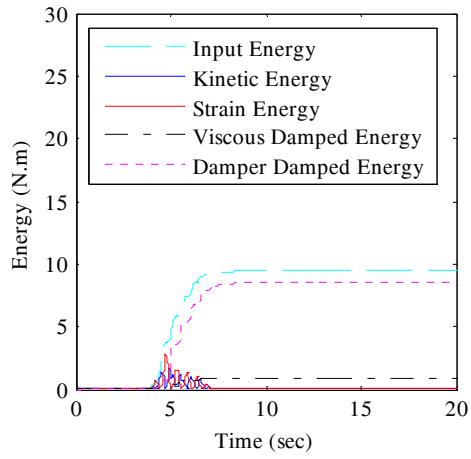
(ب)



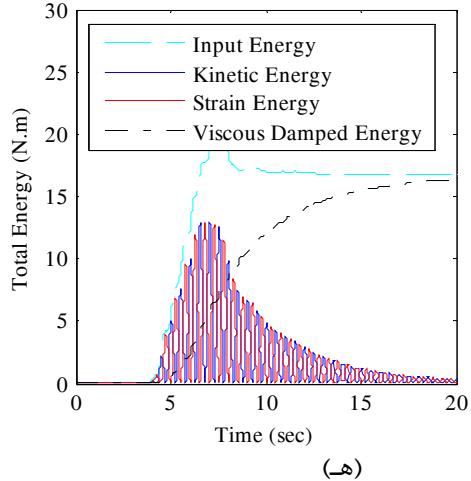
(الف)



(د)



(ج)



(هـ)

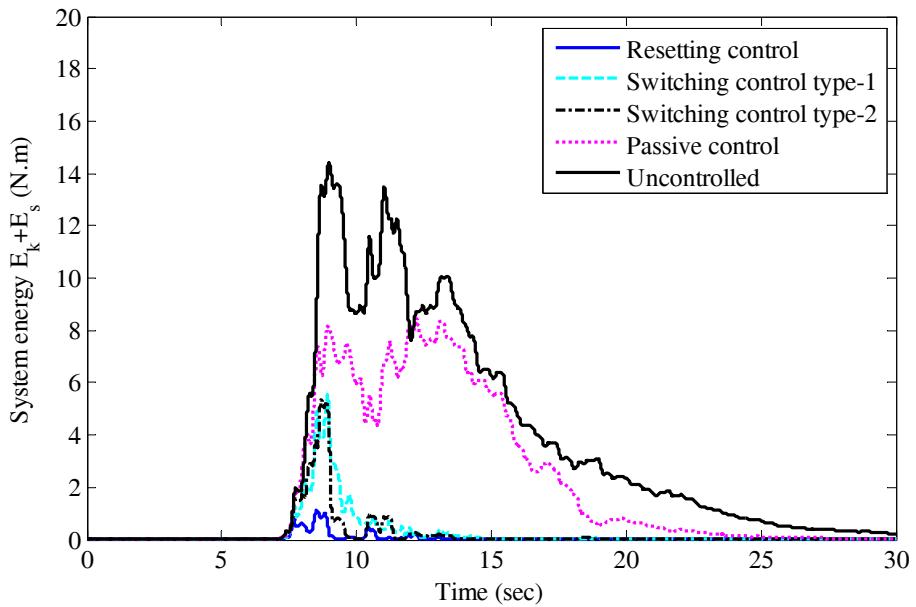
شکل ۵-۲۱- پاسخ زمانی انرژی کل سیستم یک درجه آزاد تحت زلزله لوماپریتا (۱۹۸۹) ایستگاه سد لگزینگتون وقتی $K_d = K$: (الف) روش کنترل باز تنظیمی، (ب) روش کنترل قطع و وصل نوع ۱، (ج) روش کنترل قطع و وصل نوع ۲، (د) روش کنترل غیرفعال، (هـ) کنترل نشده.

۵-۴-۷- مجموع انرژی جنبشی و پتانسیل سیستم

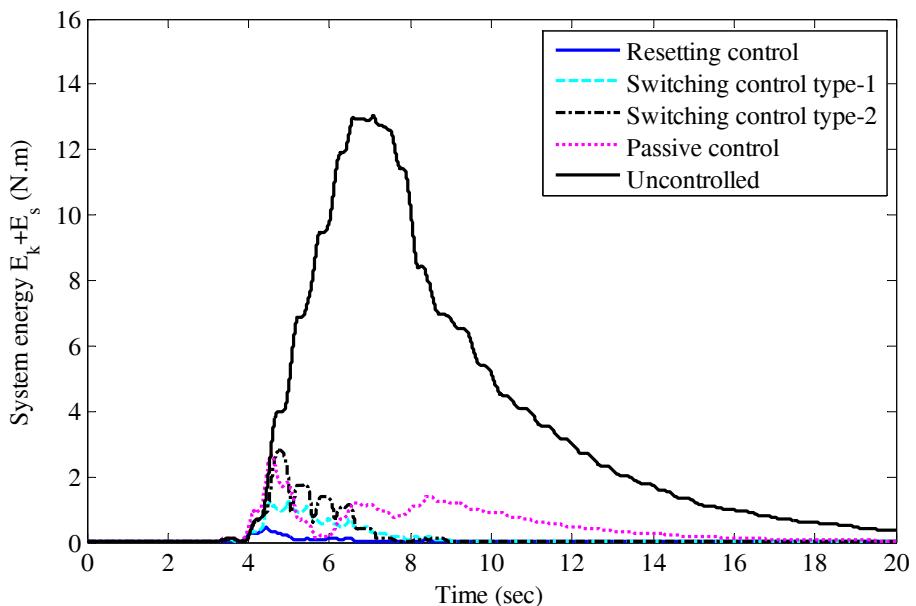
پاسخ زمانی مجموع انرژی جنبشی و پتانسیل سیستم در شکل ۵-۲۲ و شکل ۵-۲۳ به ترتیب برای زلزله‌های کوبه (ایستگاه JMA) و لوماپریتا (ایستگاه سد لگزینگتون) نشان داده شده است. مجموع انرژی جنبشی و پتانسیل (انرژی سیستم) در واقع می‌تواند به عنوان معیاری برای سنجش میزان انرژی موجود در سیستم مورد استفاده قرار گیرد. در سیستم‌های دینامیکی در صورت عدم وجود مکانیزم اتلاف انرژی، انرژی جنبشی و پتانسیل مرتباً به یکدیگر تبدیل شده و به صورت تئوریک سیستم بدون وقفه ارتعاش می‌نماید. در عمل این موضوع اتفاق نمی‌افتد، چرا که همواره مکانیزم‌هایی مانند اصطکاک، مقاومت هوا و ... وجود دارند که باعث اتلاف انرژی و نهایتاً توقف سیستم می‌شوند. بنابراین میزان افت مجموع انرژی جنبشی و پتانسیل سیستم در طول زمان را می‌توان برای سنجش عملکرد مکانیزم اتلاف انرژی به کار رفته در سیستم، مورد ارزیابی قرار داد. مقادیر کوچک‌تر انرژی سیستم، نشان دهنده تقاضای کمتر اتلاف انرژی در سیستم است و هرچه این مقدار در طول زمان سریع‌تر کاهش پیدا کند نشان دهنده عملکرد مناسب مکانیزم اتلاف انرژی به کار رفته در سیستم است.

با دقت در شکل ۵-۲۲ مشاهده می‌شود که روش‌های کنترلی به کار رفته توانسته‌اند انرژی سیستم را تحت زلزله کوبه (ایستگاه JMA) به سرعت کاهش دهند و عملاً انرژی سیستم پس از گذشت ۱۰ ثانیه به صفر رسیده و سیستم متوقف شده است. همچنین مقدار انرژی سیستم نیز به صورت موثری کاهش داشته است. هرچند روش کنترل غیرفعال عملکرد مناسبی نداشته است و فقط اندکی مقدار انرژی سیستم را کاهش داده است.

در زلزله لوماپریتا (ایستگاه سد لگزینگتون)، تقریباً تمام روش‌های کنترل توانسته‌اند مقدار انرژی سیستم را به طور چشم‌گیری کاهش دهند به طوری که انرژی سیستم بعد از گذشت ۸ ثانیه صفر شده و سیستم متوقف شده است.



شکل ۵-۲۲- پاسخ زمانی مجموع انرژی پتانسیل و جنبشی سیستم یک درجه آزاد تحت زلزله کوهه
.K_d=K ایستگاه JMA وقتی (۱۹۹۵)



شکل ۵-۲۳- پاسخ زمانی مجموع انرژی پتانسیل و جنبشی سیستم یک درجه آزاد تحت زلزله
لوماپریتا (۱۹۸۹) ایستگاه سد لگزینگتون وقتی K

فصل ششم

شبیه‌سازی عددی سازه‌های مجهز به
میراگرها تحت MR-HSRD تحت
زلزله‌های حوزه نزدیک

۱-۶- مقدمه

در این فصل به بررسی پاسخ سازه‌های مجهر به میراگرهای MR-HSRD تحت زلزله‌های حوزه نزدیک پرداخته می‌شود. به منظور ارزیابی جامع عملکرد میراگرهای MR-HSRD در معرض زلزله‌های حوزه نزدیک، رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه مجهر به میراگرهای MR-HSRD تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک شبیه‌سازی شده و پاسخ آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. ساختمان‌های مورد مطالعه به ترتیب معرف سازه‌های کوتاه، متوسط و بلند می‌باشند که می‌توانند نحوه عملکرد این میراگرهای را به طور جامع تری نمایان سازد. بدین منظور این ساختمان‌ها مطابق آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران طراحی شده و کلیه محدودیت‌های آیین‌نامه ارضاء شده است. با توجه به متقارن بودن پلان ساختمان‌های مورد مطالعه، یکی از قاب‌های میانی هر یک از ساختمان‌ها که بیانگر رفتار کلی ساختمان است، انتخاب شده و به صورت دو بعدی مدل‌سازی شده است.

۲-۶- مدل‌سازی قاب‌های ساختمانی ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه مجهر به میراگرهای MR-HSRD

در این بخش رفتار قاب‌های ساختمانی تحت زلزله‌های حوزه نزدیک مدل‌سازی شده است. با توجه به پیچیدگی سیستم‌های کنترل مورد بررسی و زمان بر بودن روش‌های مستقیم حل معادلات حرکت سیستم‌های چند درجه آزادی، از روش مدل‌سازی فضای حالت^{۱۶۵} استفاده می‌شود. بدین منظور از نرم‌افزار MATLABTM و SimulinkTM برای مدل‌سازی رفتار سازه‌های مورد مطالعه در فضای حالت استفاده شده است. در این تحقیق رفتار قاب‌ها به صورت الاستیک خطی و غیر وابسته به زمان^{۱۶۶} فرض شده‌اند. روش‌های کنترل به کار رفته همان طور که در بخش ۵-۳ تشریح شد عبارتند از روش کنترل باز تنظیمی، روش کنترل قطع و وصل نوع ۱ و روش کنترل قطع و وصل نوع ۲. علاوه بر این، رفتار میراگر در حالت کنترل غیرفعال (زمانی که شیر کنترل میراگر بسته است) که ممکن است به دلیل خرابی شیر میراگر به وجود آید نیز بررسی شده است. در حالت کنترل غیرفعال میراگر به صورت یک فنر عمل کرده و سختی آن به سختی سیستم اضافه می‌شود. روش کنترل غیرفعال از یک نظر

^{۱۶۵} State-space

^{۱۶۶} Time-invariant

دیگر هم می‌تواند حایز اهمیت باشد و آن بررسی نقش افزودن سختی برای کاهش پاسخ لرزه‌ای است که در این تحقیق نتایج این روش به همراه سایر روش‌های کنترلی ذکر شده با نتایج پاسخ لرزه‌ای سازه کنترل نشده مقایسه شده است.

۱-۲-۶- مدل‌سازی به روش فضای حالت

روش فضای حالت یک تکنیک قدرتمند برای تحلیل سیستم‌های دینامیکی پیچیده با استفاده از دیدگاه حالت سیستم است. یک مزیت عمده این روش ترکیب دیدگاه حالت سیستم و سرعت بالای حل معادلات دیفرانسیل حاکم بر سیستم است که می‌تواند با استفاده از پردازشگرهای دیجیتالی و نرم‌افزارهایی که بدین منظور توسعه یافته‌اند، انجام شود. علاوه بر این، روش فضای حالت یک روش بسیار جامع بوده و قابلیت این را دارد که هم در سیستم‌های خطی و هم در سیستم‌های غیرخطی و همچنین سیستم‌های تابع زمان^{۱۶۷} و یا غیر وابسته به زمان مورد استفاده قرار گیرند [۳۹].

معادله کلی حرکت یک سیستم n درجه آزاد را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t) \quad (1-6)$$

که در آن M , C و K به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سیستم با مرتبه $(n \times n)$ بوده و \ddot{x} , \dot{x} و x به ترتیب بردارهای شتاب، سرعت و جابجایی درجات آزادی سیستم است. $F(t)$ بردار نیروهای خارجی است که به دلیل تحركات خارجی مانند باد یا زلزله به سازه اعمال شود. به دلیل هم‌خوانی با کتب کنترل، پارامتر $F(t)$ را با u نمایش می‌دهیم. معادله (۱-۶) را می‌توان به فرم زیر بازنویسی نمود:

$$\begin{cases} \dot{x} = \dot{x} \\ \ddot{x} = -M^{-1}C\dot{x} - M^{-1}Kx + M^{-1}u \end{cases} \quad (2-6)$$

توصیف فضای حالت معادله (۲-۶) به صورت زیر خواهد شد:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1} \end{bmatrix} u \quad (3-6)$$

با تعریف پارامترهای $\dot{z} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix}$ و $z = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix}$ و

وابسته به زمان را می‌توان به صورت زیر فرمول بندی نمود:

¹⁶⁷ Time-variant

$$\begin{aligned}\dot{z}(t) &= Az(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cz(t) + Du(t)\end{aligned}\quad (4-6)$$

که در آن:

Z بردار متغیرهای حالت با بعد $2n$ است.
 y بردار متغیرهای قابل اندازه‌گیری با بعد p است.
 u بردار متغیرهای کنترلی و نیرویی با بعد m است.

ماتریس‌های A و B عبارتند از:
 $C \in R^{p \times 2n}$, $D \in R^{p \times m}$ ماتریس‌های C و D عبارتند از:

در معادله (4) بردار خروجی یا همان متغیرهای اندازه‌گیری شده (y), حاصل جمع وزنی متغیرهای کنترل و حالت است. ماتریس C یک ماتریس وزن است که حالت‌های سیستم را ترکیب می‌نماید و ماتریس D یک ماتریس وزن است که ورودی کنترل را ترکیب می‌نماید. به دلیل آن که اثر مستقیم متغیرهای کنترل u , در بردار خروجی $y(t)$, غالباً قابل چشم پوشی است، ماتریس D در بیشتر کاربردهای عملی برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. در مهندسی کنترل سازه‌ها معمولاً از روش فضایی حالت که در قسمت بالا تشریح شد استفاده می‌شود.

۶-۱-۲-۱- مدل‌سازی سیستم کنترل نشده

به منظور توسعه معادلات فضای حالت برای یک ساختمان کنترل نشده، مدل برشی یک قاب ساختمانی چند طبقه را مطابق شکل ۶-۱ در نظر می‌گیریم. در این مدل که تقریب خوبی برای اکثر سیستم‌های ساختمانی است فرض می‌شود که کلیه جرم‌ها در تراز طبقات متمرکز شده‌اند و توسط یک سری فنر و میراگر که بیانگر رفتار ستون‌ها تحت بارهای افقی می‌باشد، به یکدیگر متصل شده‌اند. این فرضیات هنگامی درست است که جرم ستون‌ها در مقایسه با جرم طبقات ناچیز بوده و طبقات به صورت صلب رفتار نموده و دچار تغییر شکل نشوند. در عمل جرم ستون‌ها در جرم طبقات لحاظ می‌شود. سختی و میرایی مدل شده صرفاً به واسطه ستون‌ها، دیوارها و اجزای غیر سازه‌ای قائم است. در این حالت ماتریس‌های جرم (M), میرایی (C) و سختی (K) سیستم را می‌توان به صورت زیر به دست آورد. با نوشتن تعادل نیروها برای طبقه ۱ مطابق شکل ۶-۱ داریم:

$$m_i \ddot{x}_i - c_i \dot{x}_{i-1} + (c_i + c_{i+1}) \dot{x}_i - c_{i+1} \dot{x}_{i+1} - k_i x_{i-1} + (k_i + k_{i+1}) x_i \\ - k_{i+1} x_{i+1} = u_i \quad (5-6)$$

که در آن u_i نیروی کنترل کل است که در طبقه i ام اعمال می‌شود.

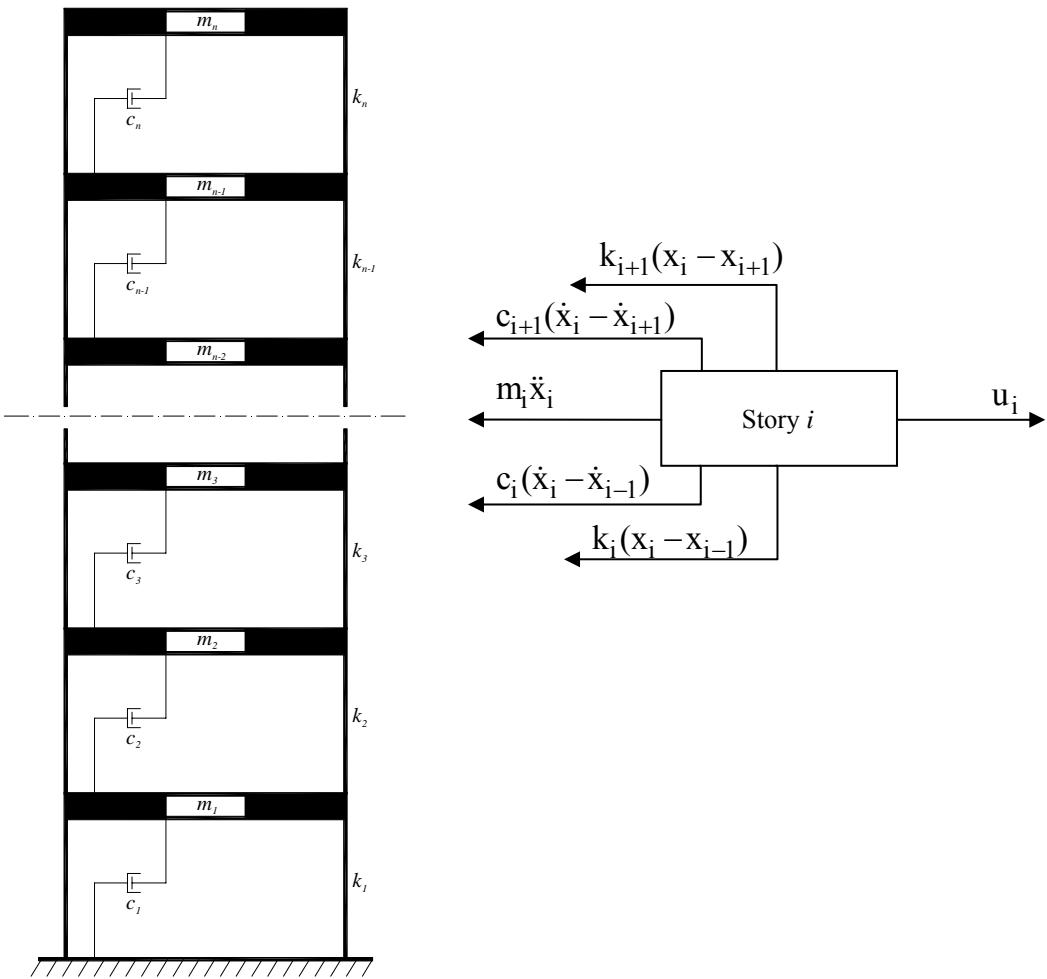
با استفاده از معادله (5) ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی را می‌توان به صورت زیر نوشت

(بخش‌های حذف شده ماتریس همگی برابر صفر می‌باشند):

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & & & & \\ & m_2 & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & m_i & \\ & & & & \ddots \\ & & & & & m_n \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & & & \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & -c_i & c_i + c_{i+1} & -c_{i+1} \\ & & & \ddots & \ddots \\ & & & & -c_{n-1} & c_{n-1} + c_n & -c_n \\ & & & & & -c_n & c_n \end{bmatrix} \quad (6-6)$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & & & \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & -k_i & k_i + k_{i+1} & -k_{i+1} \\ & & & \ddots & \ddots \\ & & & & -k_{n-1} & k_{n-1} + k_n & -k_n \\ & & & & & -k_n & k_n \end{bmatrix}$$

همان طور که معادله (6-6) ملاحظه می‌شود، ماتریس M یک ماتریس قطری بوده در حالی که ماتریس‌های C و K ماتریس‌های سه قطری می‌باشند. ماتریس A را می‌توان با استفاده از معادله (6-3) به دست آورد. ماتریس B معمولاً بیش از یک ستون دارد که برخی از ستون‌ها مربوط به نیروهای اعمال شده به سازه است (مانند نیروهای اعمال شده به واسطه شتاب افقی زمین در هنگام زلزله و یا نیروهای ناشی از باد). ماتریس B را می‌توان با استفاده از معادله (6-3) محاسبه نمود. ستون‌هایی از ماتریس B که مربوط به اثر نیروهای کنترلی میراگرها و یا محرک‌ها است بایستی با این دیدگاه ارزیابی شوند که ماتریس B یک اپراتور توبولوژی است که محل اعمال نیروهای کنترلی را مشخص می‌نماید. برای مثال اگر ساختمان چند طبقه نشان داده شده در شکل ۶-۱ فقط مجهز به یک محرک در طبقه آخر باشد، ماتریس B برای تمام درجات آزادی به جز درجه آزادی مربوط به طبقه آخر برابر صفر خواهد بود. ماتریس C را بایستی متناسب با نیاز یک مساله خاص تولید نمود. یک انتخاب مناسب برای ماتریس C ، استفاده از یک ماتریس واحد برای دسترسی مستقیم به تمام متغیرهای حالت سیستم است. در این صورت هر متغیر خروجی مستقیماً به یکی از متغیرهای حالت سیستم مرتبط است. ماتریس D همان طوری که قبلاً اشاره شد معمولاً برابر صفر است.



شکل ۶-۱- مدل برشی یک قاب ساختمانی چند طبقه فاقد سیستم کنترلی و تعادل نیروها در طبقه i ام.

با توجه به توضیحات ارایه شده، معادلات فضای حالت یک ساختمان n طبقه فاقد سیستم کنترلی که تحت تحریک زلزله قرار گرفته است را می‌توان به شرح ذیل نوشت. معادله حرکت این ساختمان عبارت است از:

$$M\ddot{\mathbf{x}} + C\dot{\mathbf{x}} + K\mathbf{x} = -M\mathbf{r}\ddot{\mathbf{x}}_g \quad (7-6)$$

که در آن \mathbf{r} یک بردار با بعد n و درایه‌های ۱ است. با بازنویسی معادله (۶-۶)، معادله فضای حالت و ماتریس‌های A , B , C و D برای یک ساختمان n طبقه فاقد سیستم کنترلی که تحت تأثیر تحریک زلزله قرار گرفته است عبارتند از:

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = Az(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cz(t) + Du(t) \end{cases}$$

$$A_{2n \times 2n} = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} & I_{n \times n} \\ -M^{-1}K_{n \times n} & -M^{-1}C_{n \times n} \end{bmatrix}, \quad B_{2n \times 1} = \begin{bmatrix} 0_{n \times 1} \\ -r_{n \times 1} \end{bmatrix} \quad (8-6)$$

$$u(t) = \ddot{x}_g, \quad C_{2n \times 2n} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \ddots & \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad D_{2n \times 1} = [0]$$

ماتریس‌های M , میرایی C و سختی K ساختمان کنترل نشده از معادله (۶-۶) محاسبه می‌شوند.

۶-۱-۲-۳- مدل‌سازی سیستم کنترل شده مجهر به میراگرهای MR-HSRD

یک مدل از میراگر MR-HSRD که توسط یک سیستم مهاربندی هم محور شورون^{۱۶۸} مطابق شکل ۶-۲ در سازه نصب شده است، در نظر گرفته می‌شود. همان طوری که در شکل مشاهده می‌شود در هر طبقه، مجموعه میراگر MR-HSRD و سیستم مهاربندی به صورت دو فنر سری عمل کرده و سختی معادل آن‌ها به صورت موازی با سختی طبقه است. اگر سختی مهاربند شورون در طبقه i ام با k_{bi} نمایش داده شود، آن‌گاه سختی معادل مجموعه میراگر MR-HSRD-سیستم مهاربندی در طبقه i عبارت است از:

$$k_{hi} = \frac{k_{di} k_{bi}}{k_{di} + k_{bi}} \quad (9-6)$$

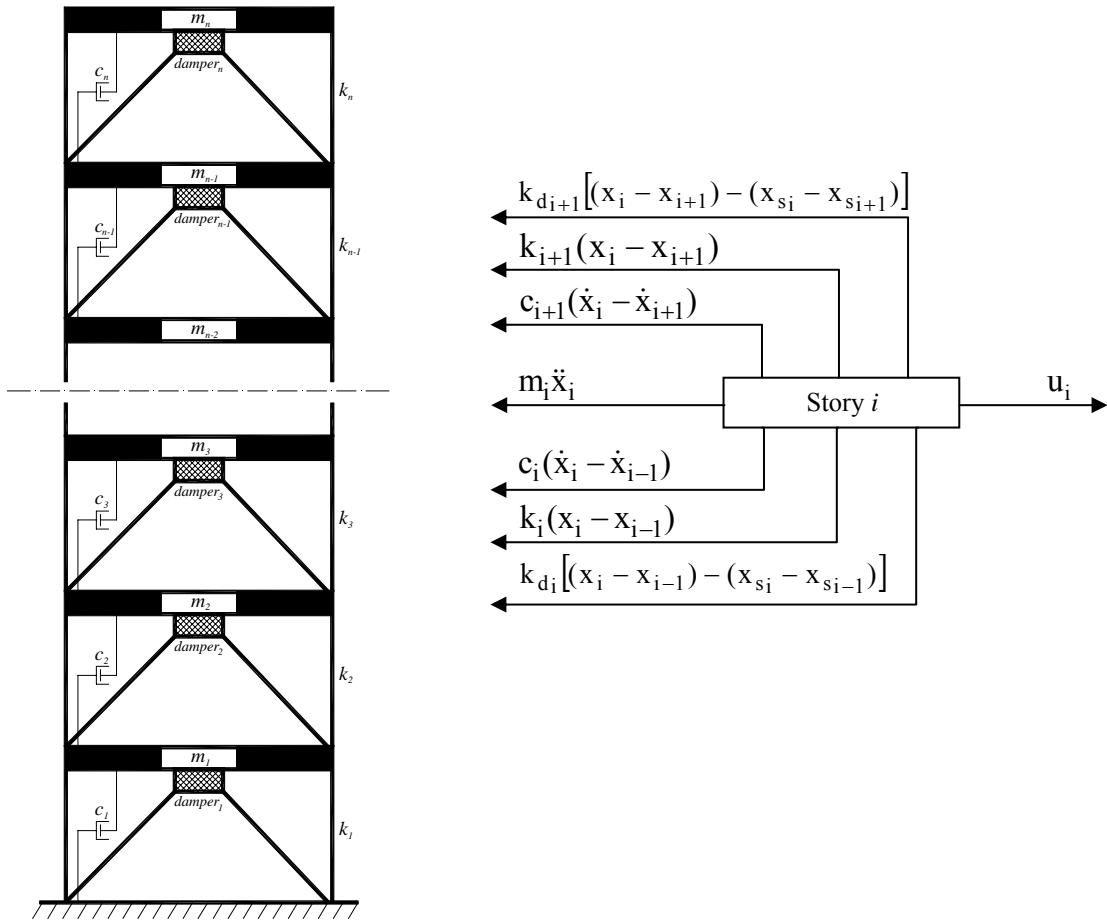
که در آن k_{di} سختی میراگر MR-HSRD در طبقه i ام است. اگر سختی سیستم مهاربندی خیلی بزرگ‌تر از سختی میراگر MR-HSRD باشد (بیش از ده برابر)، آن‌گاه سختی معادل مجموعه میراگر MR-HSRD-سیستم مهاربندی را می‌توان برابر سختی میراگر MR-HSRD به تنها‌یی در نظر گرفت.

بنابراین:

$$k_{hi} \approx k_{di} \quad \text{if} \quad k_{bi} \gg k_{di} \quad (10-6)$$

¹⁶⁸ Chevron

در این تحقیق فرض شده است که سختی سیستم مهاربندی به اندازه کافی بزرگ هست که بتوان از معادله (۶-۹) به جای معادله (۶-۱۰) استفاده نمود.



شکل ۶-۲- مدل برشی یک قاب ساختمانی چند طبقه مجهز به میراگرهای MR-HSRD و تعادل نیروها در طبقه i ام.

برای توسعه معادلات فضای حالت برای یک ساختمان مجهز به میراگرهای MR-HSRD، مدل برشی یک قاب ساختمانی چند طبقه که میراگرهای MR-HSRD در تمام طبقات آن نصب شده‌اند را در نظر می‌گیریم. با نوشتن تعادل نیروها برای طبقه i ام مطابق شکل ۶-۲ داریم:

(۱۱-۶)

$$m_i \ddot{x}_i - c_i \dot{x}_{i-1} + (c_i + c_{i+1}) \dot{x}_i - c_{i+1} \dot{x}_{i+1} - k_i x_{i-1} + (k_i + k_{i+1}) x_i - k_{i+1} x_{i+1} - k_{d,i} x_{i-1} + (k_{d,i} + k_{d,i+1}) x_i - k_{d,i+1} x_{i+1} - k_{d,i} (x_{s_i} - x_{s_{i-1}}) + k_{d,i+1} (x_{s_{i+1}} - x_{s_i}) = u_i$$

که در آن $k_{d,i}$ سختی میراگر MR-HSRD و x_{s_i} موقعیت پیستون میراگر MR-HSRD در طبقه i است. نیروی میراگر در طبقه i ام عبارت است از:

$$F_{d_i} = k_{d_i}[(x_i - x_{i-1}) - (x_{s_i} - x_{s_{i-1}})] \quad (12-6)$$

در لحظه باز تنظیم شدن میراگر، جابجایی نسبی دوسر پیستون در طبقه i ام برابر با جابجایی نسبی طبقه i ام می‌شود یا به عبارت دیگر $(x_{s_i} - x_{s_{i-1}}) = (x_i - x_{i-1})$ خواهد شد و در نتیجه نیروی میراگر برابر صفر می‌شود.

فرم ماتریسی معادلات حرکت ساختمان n طبقه نشان داده شده در شکل ۶-۲ را که تحت تحریک زلزله قرار گرفته را با استفاده از معادله (۱۱-۶) می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + (K + K_d)x + K_{ds}x_{drift} = -Mr\ddot{x}_g \quad (13-6)$$

که در آن \ddot{x} ، \dot{x} و x به ترتیب بردارهای شتاب، سرعت و جابجایی درجات آزادی سیستم و بردار جابجایی نسبی دو سر پیستون میراگر در طبقات مختلف است. فرم ماتریسی نیروی میراگر عبارت است از:

$$F_d = \hat{K}_d(x_{drift} - x_{s_{drift}}) \quad (14-6)$$

که در آن x_{drift} بردار جابجایی نسبی طبقات است.

با استفاده از معادله (۱۱-۶) ماتریس‌های M، C، K، K_d و K_{ds} را می‌توان به صورت زیر نوشت (بخش‌های حذف شده ماتریس همگی برابر صفر می‌باشند):

$$\begin{aligned}
M &= \begin{bmatrix} m_1 & & & \\ & m_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & m_i \\ & & & & \ddots \\ & & & & & m_n \end{bmatrix} \\
C &= \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & & & & \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & & \\ & & -c_i & c_i + c_{i+1} & -c_{i+1} & \\ & & & \ddots & \ddots & \\ & & & & -c_{n-1} & c_{n-1} + c_n \\ & & & & & -c_n \end{bmatrix} \\
K &= \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & & & & \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & & \\ & & -k_i & k_i + k_{i+1} & -k_{i+1} & \\ & & & \ddots & \ddots & \\ & & & & -k_{n-1} & k_{n-1} + k_n \\ & & & & & -k_n \end{bmatrix} \\
K_d &= \begin{bmatrix} k_{d1} + k_{d2} & -k_{d2} & & & & \\ -k_{d2} & k_{d2} + k_{d3} & -k_{d3} & & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & & \\ & & -k_{di} & k_{di} + k_{di+1} & -k_{di+1} & \\ & & & \ddots & \ddots & \\ & & & & -k_{dn-1} & k_{dn-1} + k_{dn} \\ & & & & & -k_{dn} \end{bmatrix} \\
K_{ds} &= \begin{bmatrix} -k_{d1} & k_{d2} & & & & \\ & -k_{d2} & k_{d3} & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & -k_{di} & k_{di+1} & \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & -k_{dn} \end{bmatrix} \\
\end{aligned} \tag{15-6}$$

ماتریس \hat{K}_d و بردارهای x_{drift} و $x_{s,drift}$ نیز به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\hat{K}_d = \begin{bmatrix} K_{d1} & & & & & \\ & K_{d2} & & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & K_{di} & & \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & K_{dn} \end{bmatrix}, \quad x_{drift} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 - x_1 \\ \vdots \\ x_i - x_{i-1} \\ \vdots \\ x_n - x_{n-1} \end{bmatrix}, \quad x_{s,drift} = \begin{bmatrix} x_{s1} \\ x_{s2} - x_{s1} \\ \vdots \\ x_{si} - x_{si-1} \\ \vdots \\ x_{sn} - x_{sn-1} \end{bmatrix} \tag{16-6}$$

همان طور که در معادلات (15-6) و (16-6) ملاحظه می‌شود، ماتریس‌های M و \hat{K}_d ماتریس‌های قطری بوده، ماتریس K_{ds} یک ماتریس دو قطری است و ماتریس‌های C ، K و K_d ماتریس‌های سه قطری می‌باشند.

با توجه به رابطه (۶-۴)، معادلات فضای حالت یک ساختمان n طبقه مجهز به میراگرهای MR-HSRD که تحت تأثیر تحریک زلزله قرار گرفته است را می‌توان به شرح ذیل نوشت:

(۶-۱۷)

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = Az(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cz(t) + Du(t) \end{cases}$$

$$A_{2n \times 2n} = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} & I_{n \times n} \\ -M^{-1}(K + K_d)_{n \times n} & -M^{-1}C_{n \times n} \end{bmatrix}, \quad B_{2n \times (n+1)} = \begin{bmatrix} 0_{n \times 1} & 0_{n \times n} \\ -I_{n \times 1} & -M^{-1}K_{d_{s n \times n}} \end{bmatrix}$$

$$u(t)_{(n+1) \times 1} = \begin{bmatrix} \ddot{x}_g \\ x_{s\text{drift}} \end{bmatrix}, \quad C_{2n \times 2n} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \ddots & \ddots \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad D_{2n \times (n+1)} = [0]$$

ماتریس‌های M , C , K_d و K_{ds} از معادله (۶-۱۵) محاسبه می‌شوند.

۶-۲-۲- مشخصات قاب‌های ساختمانی مدل‌سازی شده

ساختمان‌های مورد مطالعه دارای ابعاد $m \times 18 \times 18$ در پلان می‌باشند. سیستم باربر جانبی کلیه ساختمان‌ها قاب خمی معمولی بوده و در هر جهت از چهار قاب با دهانه‌های مساوی ۶ متر و ارتفاع طبقات یکسان $\frac{3}{2}$ متر تشکیل شده‌اند. پلان کلیه طبقات به صورت تیپ در نظر گرفته شده و بارگذاری همه طبقات یکسان می‌باشد. سیستم کف طبقات دال بتنی دوطرفه بوده و فرض شده که رفتار این کف به صورت دیافراگم صلب است. این ساختمان‌ها بر اساس ضوابط مبحث ۶ مقررات ملی ساختمان ایران [۹۴] بارگذاری شده‌اند. طراحی لرزه‌ای ساختمان‌ها بر اساس آینه‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰ ایران) [۹۵] برای پهنه با خطر نسبی خیلی زیاد، ضریب اهمیت متوسط و خاک تیپ دو انجام شده است. طراحی سازه‌ای بر اساس مبحث ۱۰ مقررات ملی ساختمان ایران [۹۶] صورت گرفته است. بار مرده و زنده تمام طبقات به ترتیب برابر 600 kg/m^2 و 200 kg/m^2 در نظر گرفته شده است و درصد مشارکت بار زنده در نیروی موثر زلزله برابر 20% لحاظ شده است. برای کلیه ستون‌ها از مقاطع Box و برای کلیه تیرها از مقاطع IPE استفاده شده است. مشخصات فیزیکی قاب‌های مورد مطالعه که به صورت یک مدل برشی دو بعدی در نظر گرفته شده‌اند

در جداول ۱-۶ الی ۳-۶ ارائه شده است. مد شکل‌ها و زمان تناوب سه مد اول قاب‌های مطالعه شده نیز در شکل ۳-۶ نشان داده شده است.

جدول ۶-۱- مشخصات فیزیکی قاب ۵ طبقه.

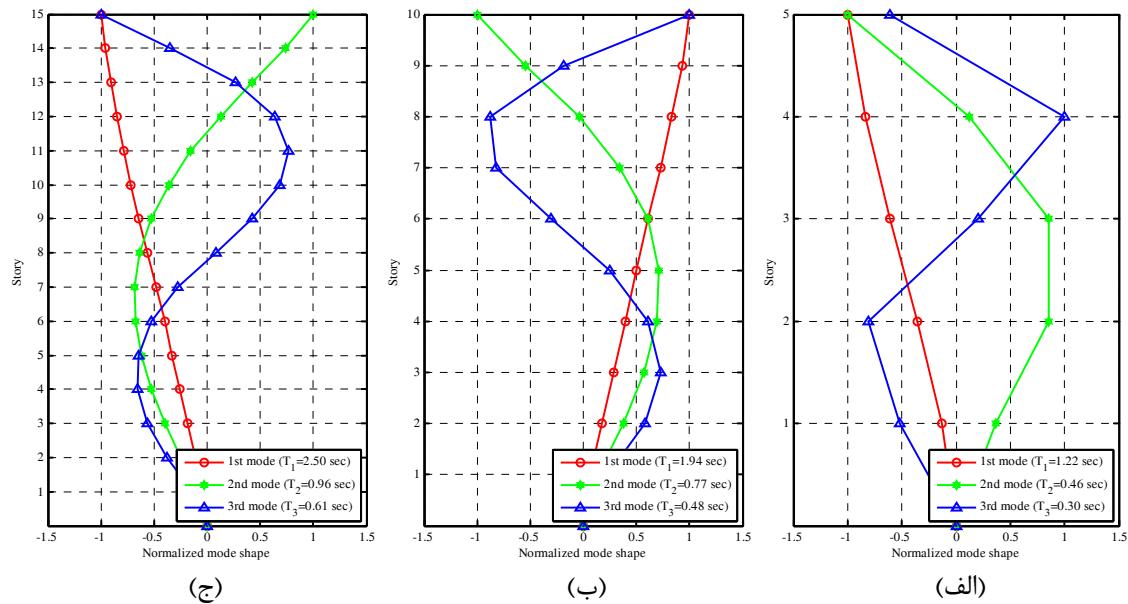
طبقه	سختی طبقه k_i (kN/m)	جرم طبقه m_i (ton)
1	44755.6	74.2
2	23299.4	73.6
3	18706.2	73.1
4	15753.6	72.7
5	11679.8	71.5

جدول ۶-۲- مشخصات فیزیکی قاب ۱۰ طبقه.

طبقه	سختی طبقه k_i (kN/m)	جرم طبقه m_i (ton)
1	68846.2	76.9
2	37304.9	76.1
3	35798.5	75.3
4	35798.5	75.0
5	33676.9	74.5
6	28306.6	73.9
7	22266.4	73.6
8	20273.3	73.0
9	14654.3	72.6
10	10471.4	71.5

جدول ۶-۳- مشخصات فیزیکی قاب ۱۵ طبقه.

طبقه	سختی طبقه k_i (kN/m)	جرم طبقه m_i (ton)
1	97425.5	78.1
2	53019.6	77.6
3	51782.2	76.8
4	50832.9	76.4
5	49983.4	76.3
6	48625.1	76.1
7	40409.1	75.6
8	34510.8	75.5
9	34510.8	75.0
10	32319.4	74.6
11	32319.4	74.3
12	25459.9	73.6
13	22266.4	73.3
14	16954.9	72.8
15	11805.0	71.6



شکل ۶-۳- مد شکل‌ها و زمان تناوب سه مد اول قاب‌های مطالعه شده (الف) قاب ۵ طبقه، (ب) قاب ۱۵ طبقه، (ج) قاب ۱ طبقه.

۶-۲-۱- ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی

ماتریس جرم برای قاب‌های کنترل شده و کنترل نشده یکسان بوده و از معادله (۶-۶) محاسبه می‌شود. ماتریس سختی قاب‌های کنترل نشده از معادله (۶-۶) محاسبه می‌شود. ماتریس سختی قاب‌های مجهز به میراگرهای MR-HSRD برای روش‌های کنترل باز تنظیمی، روش کنترل قطع و وصل نوع ۱ و روش کنترل قطع و وصل نوع ۲ از معادله (۶-۱۵) به دست می‌آید. برای روش کنترل غیرفعال، با توجه به این که سختی سیستم ثابت بوده و میراگر عملاً به صورت یک فنر که موازی با سختی طبقه است عمل می‌نماید، سختی کل سیستم در هر طبقه برابر با حاصل جمع سختی طبقه و سختی میراگر است که مقدار آن را می‌توان از جمع کردن ماتریس K_d و K_d در معادله (۶-۱۵) به دست آورد. ماتریس میرایی بر اساس میرایی مودال محاسبه می‌شود [۹۷]. بدین ترتیب که فرض می‌شود میرایی در هر مد مناسب با فرکانس مود بوده و مقدار حداکثر آن برابر ۱۰٪ میرایی بحرانی در نظر گرفته می‌شود. نسبت میرایی مد اول را برابر ۰.۲٪ فرض کرده و نسبت میرایی مد ۲ از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\xi_i = \min \left\{ \frac{0.02}{\omega_1} \omega_i, 0.1 \right\} \quad (18-6)$$

که در آن ω_i فرکانس مددی است. بنابراین ماتریس میرایی را برای قابها کنترل شده و کنترل نشده می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$C = M\Phi \begin{bmatrix} 2\xi_1\omega_1 & & & \\ & \ddots & & \\ & & 2\xi_i\omega_i & \\ & & & \ddots \\ & & & & 2\xi_n\omega_n \end{bmatrix} \Phi^{-1} \quad (19-6)$$

که در آن Φ ماتریس مدد شکل‌های سازه است. در نرم افزار MATLAB ماتریس C را می‌توان با استفاده از دستور زیر به دست آورد:

$$\begin{aligned} [V, D] &= \text{eig}(K, M) \\ w_i &= \sqrt(D) \\ X_i &= \min((0.02/w_1)*w_i, 0.1) \\ C &= M * V * 2 * X_i * w_i * \text{inv}(V) \end{aligned} \quad (20-6)$$

که در آن M و K به ترتیب ماتریس‌های جرم و سختی قاب بوده و V و D به ترتیب بردارهای ویژه و مقادیر ویژه ماتریس $M^{-1}K$ هستند. w_i فرکانس طبیعی مددی است و X_i نسبت میرایی مددی است.

۳-۲-۶- مشخصات زلزله‌های حوزه نزدیک مطالعه شده

به منظور بررسی اثر زلزله‌های حوزه نزدیک بر روی سازه‌های مجهز به میراگرهای MR-HSRD در این تحقیق از مجموعه‌ای شامل ۱۰ رکورد زلزله حوزه نزدیک تاریخی که در پروژه SAC [۹۸] به کار رفته‌اند، استفاده شده است. مشخصات زلزله‌های استفاده شده به شرح جدول ۶-۴ است. PGA کلیه زلزله‌ها به $g/35$ مقیاس شده و طیف پاسخ الاستیک زلزله‌ها با نسبت میرایی $= 2\%$ ترسیم گردیده است. پاسخ زمانی شتاب، سرعت و جابجایی زلزله‌های مطالعه شده به همراه طیف پاسخ آن‌ها در ضمیمه (الف) ارایه گردیده است.

جدول -۶- مشخصات زلزله‌های حوزه نزدیک مطالعه شده.

زلزله	ایستگاه ثبت زلزله	نام گذاری زلزله	فاصله تا گسل (km)	بزرگی زلزله (M_w)
مندوسینو ^{۱۶۹} (۱۹۹۲)	پترولیا ^{۱۷۰}	CM92petr	8.5	7.1
ارزینکان ^{۱۷۱} (۱۹۹۲)	ارزینکان	EZ92erzi	2	6.7
کوبه (۱۹۹۵)	JMA	KB95kobj	0.6	6.9
کوبه (۱۹۹۵)	تاكاتوری ^{۱۷۲}	KB95tato	1.5	6.9
لندرز (۱۹۹۲)	لاسرن	LN92lucr	1.1	7.3
لوماپریتا (۱۹۸۹)	سد لکزینگتون	LP89lex	6.3	7
لوماپریتا (۱۹۸۹)	لس گاتوس ^{۱۷۳}	LP89lgpc	3.5	7
نورثریدج (۱۹۹۴)	رینالدی ^{۱۷۴}	NR94rrs	7.5	6.7
نورثریدج (۱۹۹۴)	اویلویو ^{۱۷۵}	NR94sylm	6.4	6.7
طبس ^{۱۷۶} (۱۹۷۸)	طبس	TB78tab	1.2	7.4

۳-۶- مقایسه عملکرد قاب‌های کنترل نشده و قاب‌های مجهرز به میراگرهای MR-HSRD تحت زلزله‌های حوزه نزدیک

در این بخش مقایسه پاسخ لرزه‌ای قاب‌های کنترل نشده و قاب‌های مجهرز به میراگرهای MR-HSRD تحت زلزله‌های حوزه نزدیک معرفی شده در بخش قبل، ارایه شده است. به منظور بررسی عملکرد روش‌های کنترلی مختلف بر روی عملکرد لرزه‌ای این قاب‌ها، پاسخ روش‌های کنترل باز تنظیمی، قطع و وصل نوع ۱، قطع و وصل نوع ۲ و روش کنترل غیرفعال با پاسخ قاب کنترل نشده مقایسه شده است. علاوه بر این، به منظور بررسی اثر سختی میراگر در کاهش پاسخ لرزه‌ای قاب‌ها، میراگرهایی با سختی معادل ۰.۲۵٪، ۰.۵۰٪ و ۱۰۰٪ سختی قاب در هر طبقه مدل‌سازی شده است. به منظور مقایسه عملکرد لرزه‌ای قاب‌ها، پاسخ تغییرمکان طبقه، تغییرمکان نسبی طبقه^{۱۷۷}، شتاب مطلق طبقه، شتاب

^{۱۶۹} Mendocino

^{۱۷۰} Petrolia

^{۱۷۱} Erzincan

^{۱۷۲} Takatori

^{۱۷۳} Los Gatos

^{۱۷۴} Rinaldi

^{۱۷۵} Olive View

^{۱۷۶} Tabas

^{۱۷۷} Drift

RMS طبقه، برش طبقه، برش پایه و نیروی مقاوم میراگر برای کلیه قابها تحت ۱۰ رکورد حوزه نزدیک برای روش‌های مختلف کنترلی بررسی گردیده است که در ادامه نتایج آن برای هر یک از قاب‌های مطالعه شده ارایه شده است. شتاب RMS طبقه به عنوان معیاری برای سنجش آسایش ساکنین در حین زلزله از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$a_{RMS} = \sqrt{\sum_{i=1}^n a_i^2 \Delta t / T} \quad (21-6)$$

۱-۳-۶- قاب ساختمانی ۵ طبقه

در این بخش نتایج تحلیل خطی قاب ۵ طبقه تحت زلزله‌های حوزه نزدیک مقیاس شده ارایه شده است. زمان تناوب سه مد اول قاب ۵ طبقه به ترتیب برابر $1/42$ ثانیه، $0/46$ ثانیه و $0/3$ ثانیه است. پاسخ‌های حداکثر قاب ۵ طبقه در جداول ۱۴-۶ الی ۱۴-۵ ارایه شده است. در این جداول مقادیر حداکثر تغییرمکان، تغییرمکان نسبی، شتاب مطلق، شتاب RMS، برش طبقه و نیروی مقاوم میراگر برای میراگرهایی با نسبت‌های سختی (K_d/K_c) مختلف برابر $0/25$ ، $0/5$ و 1 ارایه شده است. به منظور مقایسه بهتر اثر میراگرهای بر پاسخ قاب، مقادیر پاسخ حداکثر قاب کنترل شده به پاسخ حداکثر قاب کنترل نشده نرمالایز شده است. مقادیر نرمالایز شده همگی بدون بعد می‌باشند و مقادیر کوچک‌تر نشان دهنده عملکرد بهتر روش کنترل مربوطه است. این مقادیر عبارتند از:

$$\frac{X_{max}^{con}}{X_{max}^{unc}} = \text{نسبت تغییرمکان حداکثر قاب کنترل شده به تغییرمکان حداکثر قاب کنترل نشده}$$

$$\frac{Drift_{max}^{con}}{Drift_{max}^{unc}} = \text{نسبت تغییرمکان نسبی حداکثر قاب کنترل شده به تغییرمکان نسبی حداکثر قاب کنترل نشده}$$

کنترل نشده

$$\frac{a_{max}^{con}}{a_{max}^{unc}} = \text{نسبت شتاب مطلق حداکثر قاب کنترل شده به شتاب مطلق حداکثر قاب کنترل نشده}$$

$$\frac{a_{RMS}^{con}}{a_{RMS}^{unc}} = \text{نسبت شتاب RMS حداکثر قاب کنترل شده به شتاب RMS حداکثر قاب کنترل نشده}$$

$$\frac{Vb_{max}^{con}}{Vb_{max}^{unc}} = \text{نسبت برش طبقه حداکثر قاب کنترل شده به برش طبقه حداکثر قاب کنترل نشده}$$

$$\frac{Fd_{max}}{W_e} = \text{نسبت نیروی مقاوم حداکثر میراگر به وزن موثر لرزه‌ای قاب}$$

با دقت در جداول ۱۴-۶ الی ۱۴-۵ نتایج زیر قابل استخراج است:

▪ تقریباً در تمام روش‌های کنترل مطالعه شده، جابجایی حداکثر و جابجایی نسبی حداکثر نسبت به حالت کنترل نشده کاهش یافته است. این میزان کاهش با افزایش نسبت K_d/K ، افزایش یافته است هرچند میزان آن برای زلزله‌های مختلف متفاوت است. در اکثر زلزله‌ها بیشترین میزان کاهش جابجایی نسبی حداکثر مربوط به روش کنترل باز تنظیمی بوده که بسته به نسبت K_d/K چیزی در حدود ۳۰٪-۶۵٪ کاهش داشته است. پس از آن روش کنترل قطع و وصل نوع ۱ بیشترین میزان کاهش جابجایی نسبی حداکثر را نشان می‌دهد که بسته به نسبت K_d/K چیزی در حدود ۴۵٪-۱۵٪ درصد کاهش مشاهده می‌شود. روش کنترل قطع و وصل نوع ۲ با ۱۰٪-۲۵٪ کاهش پاسخ در رتبه بعدی قرار می‌گیرد. روش کنترل غیرفعال تنها روش کنترلی است که علاوه بر کاهش قابل توجه پاسخ جابجایی حداکثر و جابجایی نسبی حداکثر در اکثر زلزله‌ها، در برخی موارد نیز (مانند زلزله کوبه-ایستگاه JMA و لوماپریتا-ایستگاه لس گاتوس) باعث افزایش جزئی پاسخ در حدود ۱۵٪-۵٪ شده است. این موضوع می‌تواند ناشی از سخت‌تر شدن سازه به دلیل اضافه شدن سختی میراگر MR-HSRD به سازه در روش کنترل غیرفعال باشد که منجر به انتقال فرکانسی سازه به محدوده فرکانس غالب زلزله شده است.

▪ در مورد شتاب مطلق حداکثر قاب روند یکسانی مشاهده نمی‌شود ولی آنچه که مشهود است روش‌های کنترل به کار رفته برای اکثر زلزله‌ها، با افزایش نسبت K_d/K ، باعث افزایش شتاب مطلق حداکثر قاب شده‌اند. به طوری که تقریباً در مورد اکثر زلزله‌ها برای نسبت $K_d/K=1$ مقدار شتاب مطلق حداکثر برای تمام روش‌های کنترل افزایش یافته است. هرچند به طور استثناء در برخی زلزله‌ها مانند کوبه (ایستگاه تاکاتوری)، لندرز و طبس روش‌های کنترل باعث کاهش شتاب مطلق حداکثر قاب شده‌اند که می‌تواند ناشی از انتقال فرکانس سازه به محدوده شتاب پایین طیف زلزله‌های مذکور باشد.

- تقریباً در تمام روش‌های کنترل به کار رفته به جز روش کنترل غیرفعال، کاهش شتاب RMS مشاهده می‌شود و میزان کاهش شتاب RMS با افزایش نسبت K_d/K افزایش می‌یابد. میزان کاهش شتاب RMS بسته به نسبت K_d/K و زلزله مورد مطالعه در روش کنترل باز تنظیمی در حدود ۹۰٪-۲۵٪، روش کنترل قطع و وصل نوع ۱ حدود ۷۵٪-۱۰٪ و در روش کنترل قطع و وصل نوع ۲ حدود ۷۵٪-۱۵٪ است.
- روش کنترل قطع و وصل نوع ۲ در تمام زلزله‌ها باعث کاهش نیروی برشی حداکثر قاب شده است و میزان کاهش با افزایش نسبت K_d/K ، افزایش یافته است. بیشترین میزان کاهش نیروی برشی حداکثر قاب برای نسبت‌های ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ به ترتیب برابر ۴۱٪، ۲۳٪ و ۵۷٪ است که مربوط به زلزله کوبه (ایستگاه تاکاتوری) است. با این حال سایر روش‌های کنترل به جز روش کنترل غیرفعال نیز در بیشتر موارد نیروی برشی حداکثر قاب را کاهش داده‌اند.

جدول ۶-۵- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۵ طبقه تحت زلزله مندوسینو (۱۹۹۲) ایستگاه پترولیا.

Control Method	x_{max} (m)	$\frac{x_{max}^{con}}{x_{max}^{unc}}$	$Drift_{max}$ (m)	$\frac{Drift_{max}^{con}}{Drift_{max}^{unc}}$	a_{max} (m/s ²)	$\frac{a_{max}^{con}}{a_{max}^{unc}}$	a_{RMS} (m/s ²)	$\frac{a_{RMS}^{con}}{a_{RMS}^{unc}}$	Vb_{max} (kN)	$\frac{Vb_{max}^{con}}{Vb_{max}^{unc}}$	Fd_{max} (kN)	$\frac{Fd_{max}}{W_e}$
$K_d=0.25K$												
Resetting control	0.227	0.72	0.057	0.70	1.43	1.00	1.41	0.76	1596.7	1.09	542.2	15.1
Switching control type-1	0.286	0.91	0.073	0.90	1.64	1.15	1.73	0.93	1613.9	1.11	322.6	9.0
Switching control type-2	0.283	0.90	0.074	0.91	1.28	0.90	1.49	0.80	1447.9	0.99	362.8	10.1
Passive control	0.311	0.99	0.078	0.97	1.58	1.11	2.67	1.44	1850.3	1.27	370.1	10.3
Uncontrolled	0.315	---	0.081	---	1.43	---	1.86	---	1458.6	---	0.0	---
$K_d=0.5K$												
Resetting control	0.176	0.56	0.044	0.54	1.35	0.94	1.25	0.67	1694.0	1.16	895.0	25.0
Switching control type-1	0.258	0.82	0.064	0.80	1.74	1.22	1.65	0.89	1725.0	1.18	575.2	16.1
Switching control type-2	0.257	0.82	0.065	0.81	1.14	0.79	1.36	0.73	1446.6	0.99	725.4	20.3
Passive control	0.292	0.93	0.074	0.92	1.62	1.13	3.45	1.85	2205.9	1.51	735.3	20.5
Uncontrolled	0.315	---	0.081	---	1.43	---	1.86	---	1458.6	---	0.0	---
$K_d=K$												
Resetting control	0.127	0.40	0.032	0.39	1.60	1.12	1.07	0.58	1809.2	1.24	1270.6	35.5
Switching control type-1	0.209	0.66	0.051	0.63	1.78	1.24	1.52	0.82	1898.3	1.30	947.2	26.5
Switching control type-2	0.254	0.81	0.064	0.80	1.67	1.17	1.21	0.65	1414.7	0.97	1413.8	39.5
Passive control	0.288	0.91	0.071	0.88	1.75	1.23	4.87	2.62	3279.9	2.25	1640.0	45.8
Uncontrolled	0.315	---	0.081	---	1.43	---	1.86	---	1458.6	---	0.0	---

جدول ۶-۶- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۵ طبقه تحت زلزله ارزینکان (۱۹۹۲) ایستگاه ارزینکان.

Control Method	x_{max} (m)	$\frac{x_{max}^{con}}{x_{max}^{unc}}$	$Drift_{max}$ (m)	$\frac{Drift_{max}^{con}}{Drift_{max}^{unc}}$	a_{max} (m/s ²)	$\frac{a_{max}^{con}}{a_{max}^{unc}}$	a_{RMS} (m/s ²)	$\frac{a_{RMS}^{con}}{a_{RMS}^{unc}}$	Vb_{max} (kN)	$\frac{Vb_{max}^{con}}{Vb_{max}^{unc}}$	Fd_{max} (kN)	$\frac{Fd_{max}}{W_e}$
$K_d=0.25K$												
Resetting control	0.284	0.73	0.071	0.72	1.05	0.85	1.49	0.37	2294.8	1.05	648.4	18.1
Switching control type-1	0.331	0.85	0.082	0.84	1.10	0.89	2.16	0.53	2359.9	1.08	470.9	13.2
Switching control type-2	0.374	0.96	0.094	0.95	1.25	1.01	2.12	0.52	2123.9	0.97	532.0	14.9
Passive control	0.339	0.88	0.086	0.87	1.22	0.98	3.30	0.81	2550.9	1.16	510.2	14.3
Uncontrolled	0.387	---	0.098	---	1.24	---	4.07	---	2192.0	---	0.0	---
$K_d=0.5K$												
Resetting control	0.214	0.55	0.053	0.54	1.27	1.02	1.18	0.29	2205.2	1.01	1010.3	28.2
Switching control type-1	0.282	0.73	0.070	0.71	1.14	0.92	1.73	0.42	2395.7	1.09	798.6	22.3
Switching control type-2	0.357	0.92	0.089	0.90	1.42	1.15	1.62	0.40	2051.9	0.94	1026.3	28.7
Passive control	0.289	0.75	0.074	0.75	1.33	1.07	3.52	0.86	2630.7	1.20	876.9	24.5
Uncontrolled	0.387	---	0.098	---	1.24	---	4.07	---	2192.0	---	0.0	---
$K_d=K$												
Resetting control	0.144	0.37	0.035	0.36	1.84	1.48	0.91	0.22	2158.1	0.98	1414.2	39.5
Switching control type-1	0.222	0.57	0.054	0.55	1.53	1.24	1.42	0.35	2339.2	1.07	1168.2	32.6
Switching control type-2	0.319	0.82	0.079	0.81	2.01	1.62	1.37	0.34	1896.7	0.87	1414.6	39.5
Passive control	0.205	0.53	0.053	0.54	1.37	1.11	3.60	0.88	2535.6	1.16	1267.8	35.4
Uncontrolled	0.387	---	0.098	---	1.24	---	4.07	---	2192.0	---	0.0	---

جدول ۶-۷- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۵ طبقه تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA

Control Method	x_{max} (m)	$\frac{x_{max}^{con}}{x_{max}^{unc}}$	$Drift_{max}$ (m)	$\frac{Drift_{max}^{con}}{Drift_{max}^{unc}}$	a_{max} (m/s ²)	$\frac{a_{max}^{con}}{a_{max}^{unc}}$	a_{RMS} (m/s ²)	$\frac{a_{RMS}^{con}}{a_{RMS}^{unc}}$	Vb_{max} (kN)	$\frac{Vb_{max}^{con}}{Vb_{max}^{unc}}$	Fd_{max} (kN)	$\frac{Fd_{max}}{W_e}$
K_d=0.25K												
Resetting control	0.243	0.78	0.060	0.77	1.30	1.06	1.62	0.70	1676.2	0.98	529.4	14.8
Switching control type-1	0.300	0.97	0.073	0.94	1.47	1.20	1.89	0.82	1938.7	1.13	387.6	10.8
Switching control type-2	0.273	0.88	0.070	0.90	1.03	0.84	1.77	0.77	1328.3	0.78	333.0	9.3
Passive control	0.339	1.09	0.086	1.10	1.43	1.17	3.03	1.31	2407.9	1.41	481.6	13.5
Uncontrolled	0.310	---	0.078	---	1.22	---	2.31	---	1712.6	---	0.0	---
K_d=0.5K												
Resetting control	0.191	0.62	0.047	0.61	1.21	0.99	1.42	0.61	1777.2	1.04	871.3	24.3
Switching control type-1	0.281	0.90	0.068	0.88	1.63	1.33	1.90	0.83	2057.1	1.20	683.7	19.1
Switching control type-2	0.236	0.76	0.064	0.82	1.05	0.86	1.57	0.68	1192.2	0.70	597.5	16.7
Passive control	0.358	1.15	0.089	1.14	1.82	1.49	4.93	2.14	3129.4	1.83	1043.1	29.1
Uncontrolled	0.310	---	0.078	---	1.22	---	2.31	---	1712.6	---	0.0	---
K_d=K												
Resetting control	0.131	0.42	0.033	0.42	1.64	1.34	1.13	0.49	1938.5	1.13	1255.8	35.1
Switching control type-1	0.242	0.78	0.058	0.75	1.94	1.59	1.88	0.82	2403.8	1.40	1200.2	33.5
Switching control type-2	0.188	0.61	0.055	0.70	1.16	0.95	1.38	0.60	989.9	0.58	729.5	20.4
Passive control	0.356	1.15	0.090	1.15	1.95	1.59	5.70	2.47	4049.1	2.36	2024.6	56.5
Uncontrolled	0.310	---	0.078	---	1.22	---	2.31	---	1712.6	---	0.0	---

جدول ۶-۸- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۵ طبقه تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه تاکاتوری.

Control Method	x_{max} (m)	$\frac{x_{max}^{con}}{x_{max}^{unc}}$	$Drift_{max}$ (m)	$\frac{Drift_{max}^{con}}{Drift_{max}^{unc}}$	a_{max} (m/s ²)	$\frac{a_{max}^{con}}{a_{max}^{unc}}$	a_{RMS} (m/s ²)	$\frac{a_{RMS}^{con}}{a_{RMS}^{unc}}$	Vb_{max} (kN)	$\frac{Vb_{max}^{con}}{Vb_{max}^{unc}}$	Fd_{max} (kN)	$\frac{Fd_{max}}{W_e}$
K_d=0.25K												
Resetting control	0.244	0.32	0.062	0.32	1.08	0.51	1.84	0.21	2216.9	0.49	751.6	21.0
Switching control type-1	0.458	0.59	0.115	0.59	1.49	0.70	3.87	0.45	3342.0	0.74	668.0	18.7
Switching control type-2	0.591	0.77	0.149	0.76	1.55	0.72	4.04	0.47	3475.9	0.77	870.2	24.3
Passive control	0.451	0.58	0.114	0.58	1.44	0.68	5.83	0.67	3479.1	0.77	695.8	19.4
Uncontrolled	0.771	---	0.195	---	2.14	---	8.68	---	4540.4	---	0.0	---
K_d=0.5K												
Resetting control	0.182	0.24	0.045	0.23	1.34	0.63	1.27	0.15	2105.8	0.46	1033.5	28.9
Switching control type-1	0.309	0.40	0.076	0.39	1.31	0.61	2.69	0.31	2665.4	0.59	887.2	24.8
Switching control type-2	0.456	0.59	0.113	0.58	1.88	0.88	2.70	0.31	2687.8	0.59	1347.4	37.6
Passive control	0.278	0.36	0.069	0.35	1.33	0.62	2.74	0.32	2494.3	0.55	831.4	23.2
Uncontrolled	0.771	---	0.195	---	2.14	---	8.68	---	4540.4	---	0.0	---
K_d=K												
Resetting control	0.113	0.15	0.029	0.15	1.52	0.71	0.90	0.10	1923.7	0.42	1212.4	33.9
Switching control type-1	0.225	0.29	0.056	0.29	1.71	0.80	1.97	0.23	2487.1	0.55	1241.8	34.7
Switching control type-2	0.332	0.43	0.084	0.43	2.60	1.22	1.87	0.22	1949.2	0.43	1947.7	54.4
Passive control	0.240	0.31	0.060	0.31	1.05	0.49	2.93	0.34	2922.2	0.64	1461.1	40.8
Uncontrolled	0.771	---	0.195	---	2.14	---	8.68	---	4540.4	---	0.0	---

جدول ۶-۹- پاسخهای حداکثر قاب ساختمانی ۵ طبقه تحت زلزله لندرز (۱۹۹۲) ایستگاه لاسرن.

Control Method	x_{max} (m)	$\frac{x_{max}^{con}}{x_{max}^{unc}}$	$Drift_{max}$ (m)	$\frac{Drift_{max}^{con}}{Drift_{max}^{unc}}$	a_{max} (m/s ²)	$\frac{a_{max}^{con}}{a_{max}^{unc}}$	a_{RMS} (m/s ²)	$\frac{a_{RMS}^{con}}{a_{RMS}^{unc}}$	Vb_{max} (kN)	$\frac{Vb_{max}^{con}}{Vb_{max}^{unc}}$	Fd_{max} (kN)	$\frac{Fd_{max}}{W_e}$
K_d=0.25K												
Resetting control	0.099	0.69	0.026	0.71	0.44	0.75	0.60	0.67	914.9	1.06	154.0	4.3
Switching control type-1	0.115	0.80	0.027	0.73	0.48	0.82	0.71	0.78	953.2	1.11	158.4	4.4
Switching control type-2	0.130	0.91	0.034	0.91	0.49	0.85	0.68	0.75	798.0	0.93	187.5	5.2
Passive control	0.097	0.68	0.026	0.69	0.58	0.99	1.16	1.28	867.1	1.01	173.4	4.8
Uncontrolled	0.143	---	0.037	---	0.58	---	0.90	---	860.6	---	0.0	---
K_d=0.5K												
Resetting control	0.084	0.59	0.023	0.62	0.44	0.76	0.57	0.63	816.2	0.95	215.6	6.0
Switching control type-1	0.101	0.70	0.027	0.72	0.47	0.80	0.66	0.73	872.1	1.01	183.0	5.1
Switching control type-2	0.124	0.86	0.033	0.88	0.53	0.91	0.61	0.68	782.6	0.91	341.1	9.5
Passive control	0.059	0.41	0.016	0.42	0.51	0.88	0.72	0.79	715.7	0.83	238.6	6.7
Uncontrolled	0.143	---	0.037	---	0.58	---	0.90	---	860.6	---	0.0	---
K_d=K												
Resetting control	0.078	0.55	0.019	0.51	0.51	0.88	0.58	0.64	808.5	0.94	306.2	8.6
Switching control type-1	0.088	0.61	0.021	0.56	0.51	0.87	0.63	0.70	860.0	1.00	293.7	8.2
Switching control type-2	0.121	0.85	0.032	0.85	0.68	1.17	0.60	0.67	701.7	0.82	433.1	12.1
Passive control	0.061	0.43	0.017	0.45	0.59	1.02	0.88	0.98	849.3	0.99	424.7	11.9
Uncontrolled	0.143	---	0.037	---	0.58	---	0.90	---	860.6	---	0.0	---

جدول ۶-۱۰- پاسخهای حداکثر قاب ساختمانی ۵ طبقه تحت زلزله لوماپریتا (۱۹۸۹) ایستگاه سد لگزینگتون.

Control Method	x_{max} (m)	$\frac{x_{max}^{con}}{x_{max}^{unc}}$	$Drift_{max}$ (m)	$\frac{Drift_{max}^{con}}{Drift_{max}^{unc}}$	a_{max} (m/s ²)	$\frac{a_{max}^{con}}{a_{max}^{unc}}$	a_{RMS} (m/s ²)	$\frac{a_{RMS}^{con}}{a_{RMS}^{unc}}$	Vb_{max} (kN)	$\frac{Vb_{max}^{con}}{Vb_{max}^{unc}}$	Fd_{max} (kN)	$\frac{Fd_{max}}{W_e}$
K_d=0.25K												
Resetting control	0.296	0.51	0.074	0.50	1.34	0.74	2.57	0.40	2380.2	0.74	802.7	22.4
Switching control type-1	0.475	0.81	0.120	0.81	1.84	1.02	4.51	0.70	3170.4	0.98	634.1	17.7
Switching control type-2	0.473	0.81	0.119	0.80	1.61	0.89	3.66	0.57	2509.6	0.78	629.9	17.6
Passive control	0.594	1.01	0.151	1.02	2.11	1.16	8.14	1.26	4238.0	1.32	847.6	23.7
Uncontrolled	0.586	---	0.148	---	1.81	---	6.47	---	3219.4	---	0.0	---
K_d=0.5K												
Resetting control	0.225	0.38	0.057	0.39	1.44	0.79	1.77	0.27	2374.4	0.74	1163.0	32.5
Switching control type-1	0.384	0.66	0.096	0.65	1.79	0.99	3.65	0.56	3133.2	0.97	1044.7	29.2
Switching control type-2	0.384	0.66	0.095	0.64	1.44	0.79	2.76	0.43	2068.5	0.64	1035.8	28.9
Passive control	0.542	0.93	0.136	0.92	2.28	1.26	7.60	1.17	4558.4	1.42	1519.5	42.4
Uncontrolled	0.586	---	0.148	---	1.81	---	6.47	---	3219.4	---	0.0	---
K_d=K												
Resetting control	0.140	0.24	0.035	0.24	2.14	1.18	1.16	0.18	2446.8	0.76	1622.9	45.3
Switching control type-1	0.266	0.45	0.066	0.45	2.09	1.15	2.75	0.43	2978.3	0.93	1489.1	41.6
Switching control type-2	0.328	0.56	0.080	0.54	2.46	1.36	2.04	0.32	1810.1	0.56	1771.2	49.5
Passive control	0.302	0.52	0.076	0.51	1.41	0.78	5.21	0.81	3606.9	1.12	1803.4	50.4
Uncontrolled	0.586	---	0.148	---	1.81	---	6.47	---	3219.4	---	0.0	---

جدول ۶-۱۱- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۵ طبقه تحت زلزله لوماپریتا (۱۹۸۹) ایستگاه لس گاتوس.

Control Method	x_{max} (m)	$\frac{x_{max}^{con}}{x_{max}^{unc}}$	$Drift_{max}$ (m)	$\frac{Drift_{max}^{con}}{Drift_{max}^{unc}}$	a_{max} (m/s ²)	$\frac{a_{max}^{con}}{a_{max}^{unc}}$	a_{RMS} (m/s ²)	$\frac{a_{RMS}^{con}}{a_{RMS}^{unc}}$	Vb_{max} (kN)	$\frac{Vb_{max}^{con}}{Vb_{max}^{unc}}$	Fd_{max} (kN)	$\frac{Fd_{max}}{W_e}$
$K_d=0.25K$												
Resetting control	0.185	0.53	0.046	0.52	1.02	0.84	1.85	0.75	1343.6	0.73	447.3	12.5
Switching control type-1	0.281	0.80	0.070	0.78	1.30	1.07	2.19	0.89	1699.8	0.92	340.0	9.5
Switching control type-2	0.278	0.79	0.071	0.79	1.14	0.94	2.11	0.86	1409.5	0.77	354.2	9.9
Passive control	0.299	0.85	0.078	0.86	1.33	1.10	3.74	1.53	2027.7	1.10	405.5	11.3
Uncontrolled	0.351	---	0.090	---	1.21	---	2.45	---	1842.3	---	0.0	---
$K_d=0.5K$												
Resetting control	0.154	0.44	0.039	0.43	0.88	0.73	1.68	0.68	1502.6	0.82	764.1	21.3
Switching control type-1	0.238	0.68	0.059	0.66	1.34	1.11	2.14	0.87	1731.0	0.94	575.6	16.1
Switching control type-2	0.235	0.67	0.060	0.67	1.04	0.85	1.96	0.80	1334.2	0.72	660.0	18.4
Passive control	0.248	0.71	0.064	0.71	1.28	1.06	3.62	1.48	2018.3	1.10	672.8	18.8
Uncontrolled	0.351	---	0.090	---	1.21	---	2.45	---	1842.3	---	0.0	---
$K_d=K$												
Resetting control	0.121	0.35	0.032	0.35	1.33	1.10	1.43	0.58	1648.5	0.89	1038.2	29.0
Switching control type-1	0.186	0.53	0.045	0.51	1.40	1.16	2.02	0.83	1792.7	0.97	894.6	25.0
Switching control type-2	0.245	0.70	0.061	0.68	1.79	1.48	1.82	0.74	1389.8	0.75	1389.3	38.8
Passive control	0.369	1.05	0.094	1.05	2.16	1.78	4.66	1.90	4032.8	2.19	2016.4	56.3
Uncontrolled	0.351	---	0.090	---	1.21	---	2.45	---	1842.3	---	0.0	---

جدول ۶-۱۲- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۵ طبقه تحت زلزله نورث‌ریدج (۱۹۹۴) ایستگاه رینالدی.

Control Method	x_{max} (m)	$\frac{x_{max}^{con}}{x_{max}^{unc}}$	$Drift_{max}$ (m)	$\frac{Drift_{max}^{con}}{Drift_{max}^{unc}}$	a_{max} (m/s ²)	$\frac{a_{max}^{con}}{a_{max}^{unc}}$	a_{RMS} (m/s ²)	$\frac{a_{RMS}^{con}}{a_{RMS}^{unc}}$	Vb_{max} (kN)	$\frac{Vb_{max}^{con}}{Vb_{max}^{unc}}$	Fd_{max} (kN)	$\frac{Fd_{max}}{W_e}$
$K_d=0.25K$												
Resetting control	0.237	0.69	0.060	0.69	1.10	0.94	1.87	0.45	1754.6	0.95	586.7	16.4
Switching control type-1	0.284	0.83	0.073	0.83	1.12	0.96	2.53	0.61	2000.7	1.08	399.3	11.2
Switching control type-2	0.296	0.86	0.075	0.86	1.04	0.89	2.63	0.63	1508.9	0.82	377.4	10.5
Passive control	0.319	0.93	0.081	0.93	1.23	1.05	3.81	0.92	2378.8	1.29	475.8	13.3
Uncontrolled	0.343	---	0.088	---	1.17	---	4.15	---	1849.7	---	0.0	---
$K_d=0.5K$												
Resetting control	0.190	0.56	0.047	0.53	1.18	1.01	1.53	0.37	1731.6	0.94	872.0	24.4
Switching control type-1	0.241	0.70	0.061	0.69	1.18	1.01	2.20	0.53	2102.1	1.14	700.3	19.6
Switching control type-2	0.276	0.80	0.070	0.80	0.99	0.84	2.08	0.50	1463.8	0.79	722.9	20.2
Passive control	0.289	0.84	0.072	0.82	1.31	1.12	4.80	1.16	2563.3	1.39	854.4	23.9
Uncontrolled	0.343	---	0.088	---	1.17	---	4.15	---	1849.7	---	0.0	---
$K_d=K$												
Resetting control	0.137	0.40	0.032	0.37	1.67	1.42	1.20	0.29	1963.7	1.06	1272.8	35.6
Switching control type-1	0.202	0.59	0.048	0.54	1.50	1.28	1.93	0.47	1998.7	1.08	999.8	27.9
Switching control type-2	0.241	0.70	0.064	0.73	1.79	1.52	1.63	0.39	1283.0	0.69	1282.8	35.8
Passive control	0.250	0.73	0.063	0.71	1.55	1.32	4.82	1.16	2804.5	1.52	1402.3	39.2
Uncontrolled	0.343	---	0.088	---	1.17	---	4.15	---	1849.7	---	0.0	---

جدول ۶-۱۳- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۵ طبقه تحت زلزله نورثridج (۱۹۹۴) ایستگاه اولیویو.

Control Method	x_{max} (m)	$\frac{x_{max}^{con}}{x_{max}^{unc}}$	$Drift_{max}$ (m)	$\frac{Drift_{max}^{con}}{Drift_{max}^{unc}}$	a_{max} (m/s ²)	$\frac{a_{max}^{con}}{a_{max}^{unc}}$	a_{RMS} (m/s ²)	$\frac{a_{RMS}^{con}}{a_{RMS}^{unc}}$	Vb_{max} (kN)	$\frac{Vb_{max}^{con}}{Vb_{max}^{unc}}$	Fd_{max} (kN)	$\frac{Fd_{max}}{W_e}$
$K_d=0.25K$												
Resetting control	0.184	0.81	0.047	0.75	0.67	0.82	0.96	0.49	1422.0	0.95	424.4	11.9
Switching control type-1	0.189	0.83	0.049	0.79	0.72	0.88	1.23	0.62	1461.2	0.98	275.0	7.7
Switching control type-2	0.224	0.99	0.059	0.95	0.76	0.93	1.29	0.65	1440.9	0.96	355.1	9.9
Passive control	0.176	0.78	0.050	0.80	0.70	0.85	1.86	0.94	1607.6	1.07	321.5	9.0
Uncontrolled	0.227	---	0.062	---	0.82	---	1.98	---	1496.2	---	0.0	---
$K_d=0.5K$												
Resetting control	0.154	0.68	0.039	0.62	0.77	0.93	0.84	0.42	1333.9	0.89	519.6	14.5
Switching control type-1	0.169	0.74	0.043	0.69	0.65	0.80	1.03	0.52	1476.0	0.99	456.6	12.8
Switching control type-2	0.220	0.97	0.057	0.91	0.93	1.13	1.10	0.56	1421.8	0.95	691.7	19.3
Passive control	0.139	0.61	0.042	0.68	0.77	0.94	1.95	0.99	1671.4	1.12	557.1	15.6
Uncontrolled	0.227	---	0.062	---	0.82	---	1.98	---	1496.2	---	0.0	---
$K_d=K$												
Resetting control	0.123	0.54	0.031	0.50	0.90	1.09	0.75	0.38	1243.8	0.83	649.3	18.1
Switching control type-1	0.146	0.64	0.036	0.58	0.80	0.98	0.90	0.45	1429.3	0.96	653.2	18.2
Switching control type-2	0.210	0.93	0.052	0.84	1.57	1.92	1.02	0.52	1312.0	0.88	1132.3	31.6
Passive control	0.103	0.45	0.028	0.46	0.73	0.89	2.24	1.13	1650.6	1.10	825.3	23.1
Uncontrolled	0.227	---	0.062	---	0.82	---	1.98	---	1496.2	---	0.0	---

جدول ۶-۱۴- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۵ طبقه تحت زلزله طبس (۱۹۷۸) ایستگاه طبس.

Control Method	x_{max} (m)	$\frac{x_{max}^{con}}{x_{max}^{unc}}$	$Drift_{max}$ (m)	$\frac{Drift_{max}^{con}}{Drift_{max}^{unc}}$	a_{max} (m/s ²)	$\frac{a_{max}^{con}}{a_{max}^{unc}}$	a_{RMS} (m/s ²)	$\frac{a_{RMS}^{con}}{a_{RMS}^{unc}}$	Vb_{max} (kN)	$\frac{Vb_{max}^{con}}{Vb_{max}^{unc}}$	Fd_{max} (kN)	$\frac{Fd_{max}}{W_e}$
$K_d=0.25K$												
Resetting control	0.100	0.41	0.027	0.46	0.57	0.46	0.91	0.45	881.6	0.63	190.5	5.3
Switching control type-1	0.131	0.54	0.032	0.54	0.73	0.59	1.22	0.60	963.9	0.68	149.2	4.2
Switching control type-2	0.160	0.66	0.043	0.72	0.83	0.67	1.16	0.57	1143.6	0.81	286.0	8.0
Passive control	0.102	0.42	0.027	0.45	0.64	0.51	1.49	0.73	825.9	0.59	165.2	4.6
Uncontrolled	0.242	---	0.060	---	1.24	---	2.03	---	1408.0	---	0.0	---
$K_d=0.5K$												
Resetting control	0.089	0.37	0.024	0.40	0.55	0.44	0.80	0.40	832.9	0.59	297.2	8.3
Switching control type-1	0.102	0.42	0.027	0.45	0.63	0.51	1.07	0.52	821.9	0.58	222.2	6.2
Switching control type-2	0.139	0.58	0.037	0.62	0.72	0.58	0.95	0.47	989.2	0.70	420.7	11.8
Passive control	0.113	0.47	0.029	0.48	0.78	0.63	1.50	0.74	1003.5	0.71	334.5	9.3
Uncontrolled	0.242	---	0.060	---	1.24	---	2.03	---	1408.0	---	0.0	---
$K_d=K$												
Resetting control	0.079	0.33	0.019	0.32	0.62	0.50	0.73	0.36	800.2	0.57	463.1	12.9
Switching control type-1	0.081	0.33	0.022	0.36	0.70	0.56	0.97	0.48	773.0	0.55	352.1	9.8
Switching control type-2	0.124	0.51	0.032	0.53	0.94	0.76	0.81	0.40	828.6	0.59	607.8	17.0
Passive control	0.210	0.87	0.055	0.91	1.50	1.21	2.97	1.46	2452.9	1.74	1226.5	34.3
Uncontrolled	0.242	---	0.060	---	1.24	---	2.03	---	1408.0	---	0.0	---

در ادامه گراف‌های پاسخ قاب ۵ طبقه برای روش‌های مختلف کنترل ارایه می‌شود. به دلیل زیاد بودن تعداد گراف‌ها، فقط پاسخ‌های مربوط به زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA به عنوان نمونه ارایه شده است.

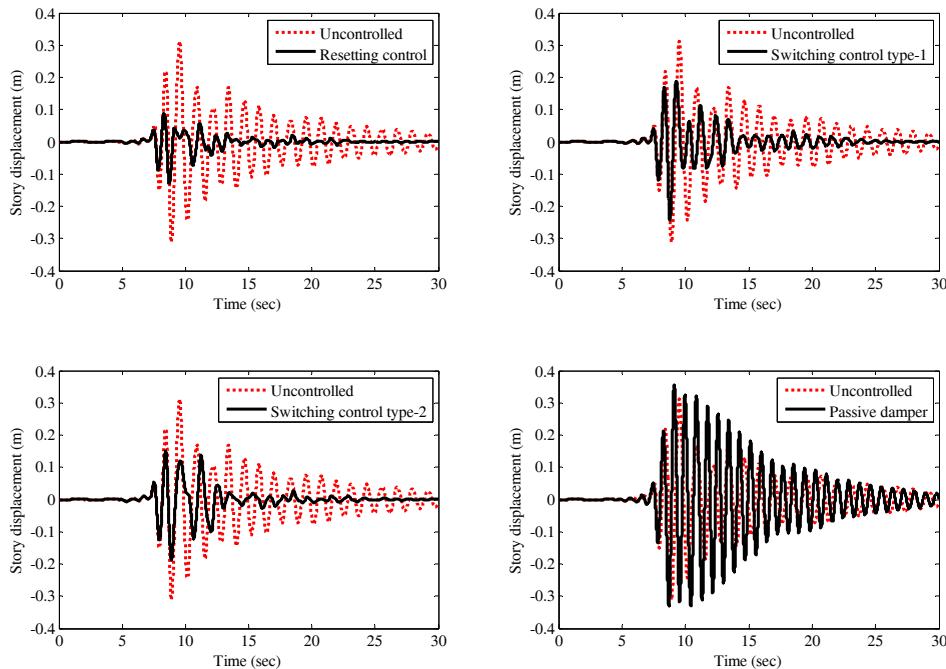
شکل ۶-۴ پاسخ زمانی جابجایی بام برای روش‌های مختلف کنترل در مقایسه با حالت کنترل نشده (برای $K_d=K$) را نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود دامنه جابجایی بام برای تمام روش‌های کنترل به جز روش کنترل غیرفعال نسبت به حالت کنترل نشده کاهش یافته است. روش کنترل باز تنظیمی بیشترین میزان کاهش را نشان می‌دهد به طوری که دامنه جابجایی بام تنها پس از ۴ سیکل جابجایی، تقریباً به صفر رسیده است. پس از آن به ترتیب روش کنترل قطع و وصل نوع ۲ و روش کنترل قطع و وصل نوع ۱ بیشترین میزان کاهش را داشته‌اند.

شکل ۶-۵ پاسخ زمانی شتاب بام را برای $K_d=K$ نشان می‌دهد. روش کنترل غیرفعال شتاب بام را به شدت افزایش داده است در حالی که روش کنترل قطع و وصل نوع ۱ اندکی مقدار شتاب بام را افزایش داده است. این در حالیست که روش کنترل باز تنظیمی اندکی شتاب را کاهش داده اما روش کنترل قطع و وصل نوع ۲ تأثیر چندانی بر شتاب بام ندارد.

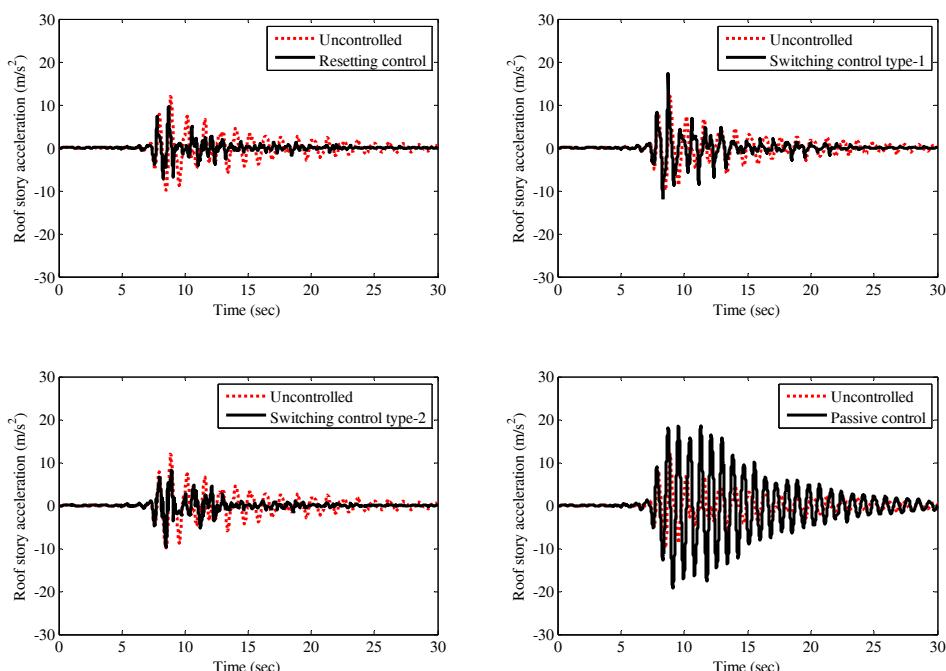
در شکل ۶-۶ جابجایی نسبی طبقات برای روش‌های مختلف کنترل و نسبت‌های متفاوت ارایه شده است. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود بیشترین میزان کاهش پاسخ جابجایی K_d/K ایجاد شده است. این در تنظیمی مربوط به روش کنترل باز تنظیمی، روش کنترل قطع و وصل نوع ۱ و روش کنترل قطع و وصل نوع ۲ است. این در حالیست که روش کنترل غیرفعال تاثیری در کاهش پاسخ کنترل قطع و وصل نوع ۲ نداشت و باعث افزایش تغییرمکان نسبی طبقات نیز شده است. علاوه بر این مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت K_d/K ، میزان کاهش پاسخ نیز افزایش می‌یابد که میزان کاهش برای روش کنترل باز تنظیمی مشهودتر است. علاوه بر این برای نسبت‌های K_d/K بزرگ‌تر، روش کنترل باز تنظیمی باعث توزیع یکنواخت‌تر جابجایی نسبی در ارتفاع قاب شده است. این رفتار قاب ۵ طبقه تقریباً در مورد تمام زلزله‌های مطالعه شده صادق است.

شکل ۶-۷ شتاب RMS طبقات را برای روش‌های مختلف کنترل نشان می‌دهد. همان طور که در شکل نشان داده شده، بیشترین میزان کاهش شتاب RMS طبقات به ترتیب مربوط به روش کنترل باز تنظیمی، روش کنترل قطع و وصل نوع ۲ و روش کنترل قطع و وصل نوع ۱ است. این در

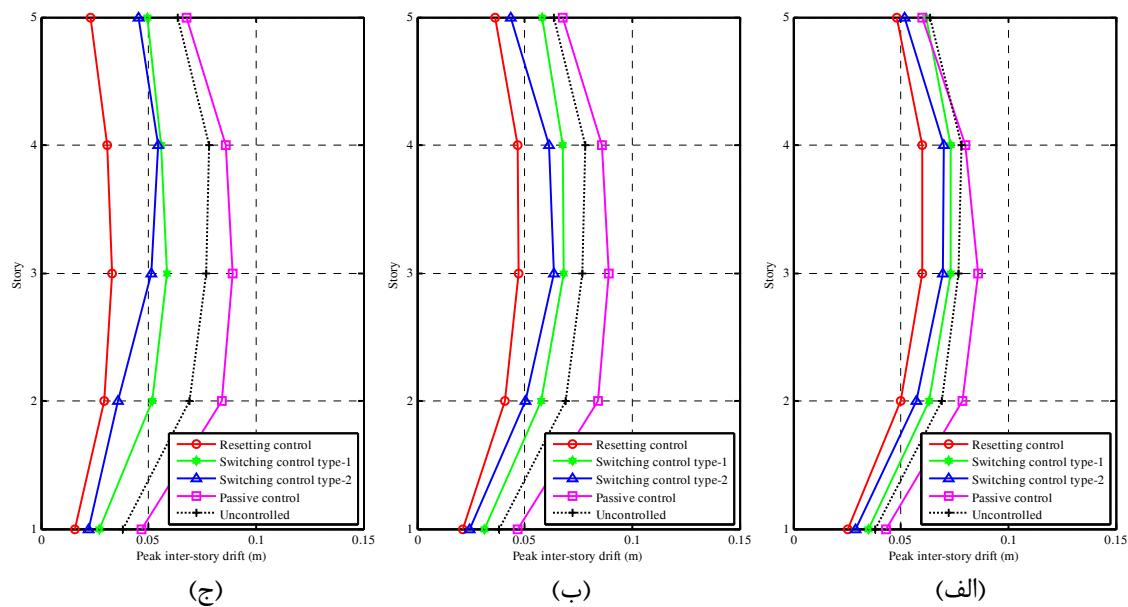
حالیست که روش کنترل غیرفعال باعث افزایش شتاب RMS طبقات نسبت به حالت کنترل نشده شده است. میزان کاهش شتاب در طبقات بالا بیش از طبقات پایین است و این میزان با افزایش نسبت K_d/K افزایش یافته است. هرچند در روش کنترل غیرفعال این قضیه بر عکس بوده و با افزایش نسبت K_d/K شتاب RMS طبقات افزایش یافته است.



شکل ۶-۴ - پاسخ زمانی جابجایی بام قاب ۵ طبقه تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA وقتی $K_d=K$

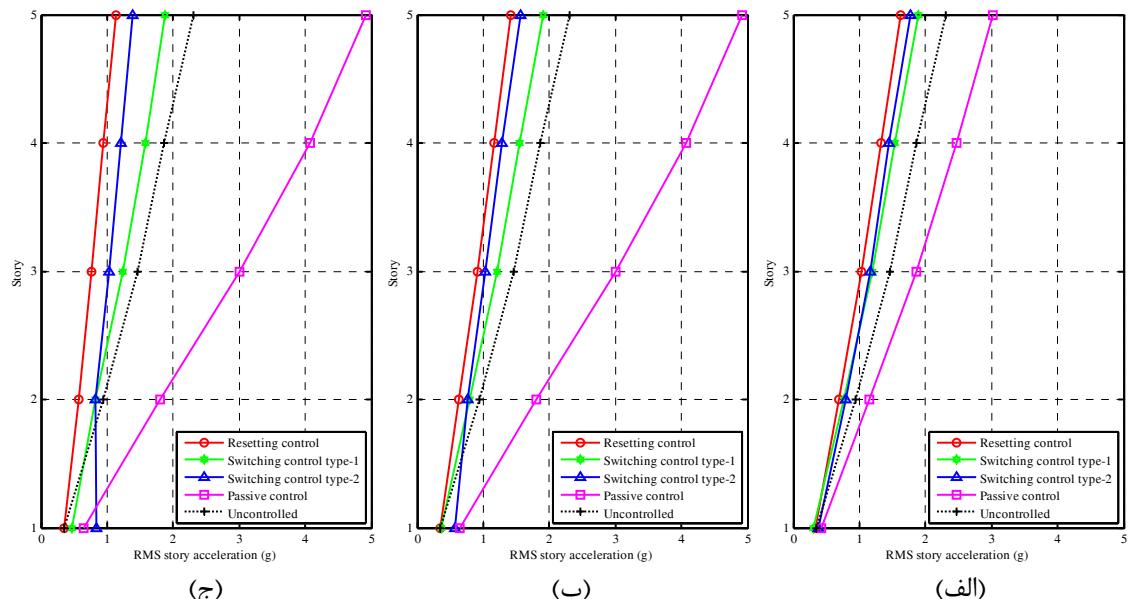


شکل ۶-۵ - پاسخ زمانی شتاب مطلق بام قاب ۵ طبقه تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA وقتی $K_d=K$



شکل ۶-۶- جابجایی نسبی تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA؛ (الف) $K_d = 0.25K$ ، (ب)

$$.K_d = K \quad (ج) \quad K_d = 0.5K$$



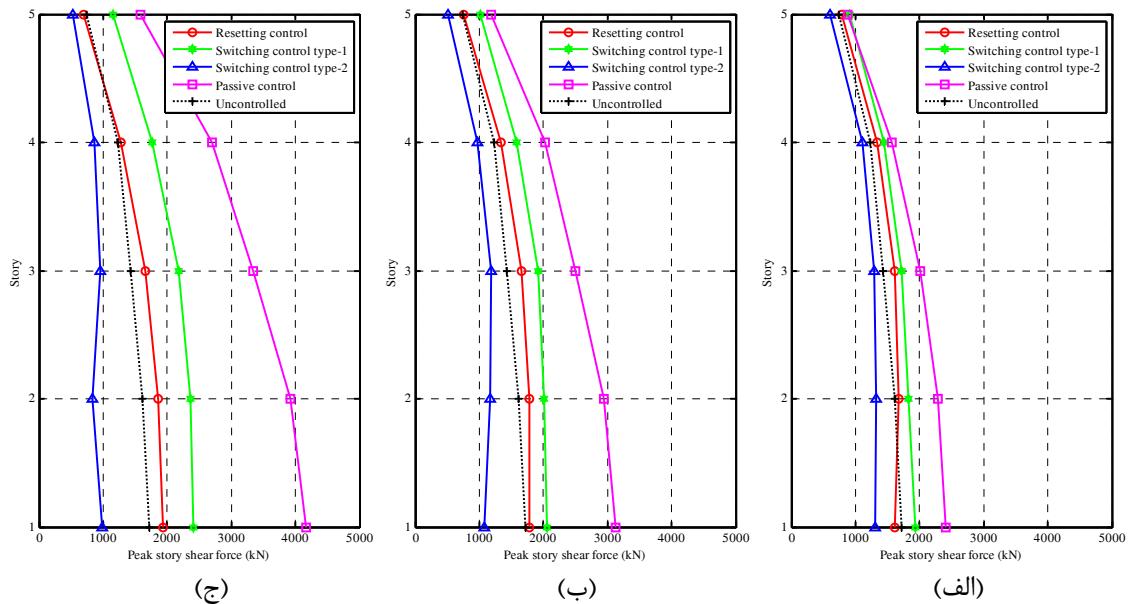
شکل ۶-۷- شتاب RMS طبقات تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA؛ (الف) $K_d = 0.25K$ ، (ب) $K_d = 0.5K$ ، (ج) $K_d = K$

در شکل ۶-۸ نیروی برشی حداقل طبقات برای روش‌های مختلف کنترل ارایه شده است. بدقت در این شکل مشاهده می‌شود که نیروی برشی طبقات برای روش‌های کنترل باز تنظیمی و کنترل قطع و وصل نوع ۱ تغییر چندانی نداشته است اما روش کنترل غیرفعال باعث افزایش نیروی

برشی حداکثر طبقات شده است. این در حالیست که در روش کنترل قطع و وصل نوع ۲، میزان برش حداکثر طبقات نسبت به حالت کنترل نشده کاهش یافته است و این کاهش با افزایش نسبت K_d/K بیشتر شده است. هرچند با افزایش نسبت K_d/K برش حداکثر طبقات برای روش‌های کنترل باز تنظیمی و کنترل قطع و وصل نوع ۱ اندکی افزایش پیدا کرده است. نکته قابل توجه در این شکل توزیع یکنواخت نیروی برشی حداکثر در ارتفاع قاب است که در روش کنترل قطع و وصل نوع ۲ کاملاً مشهود است.

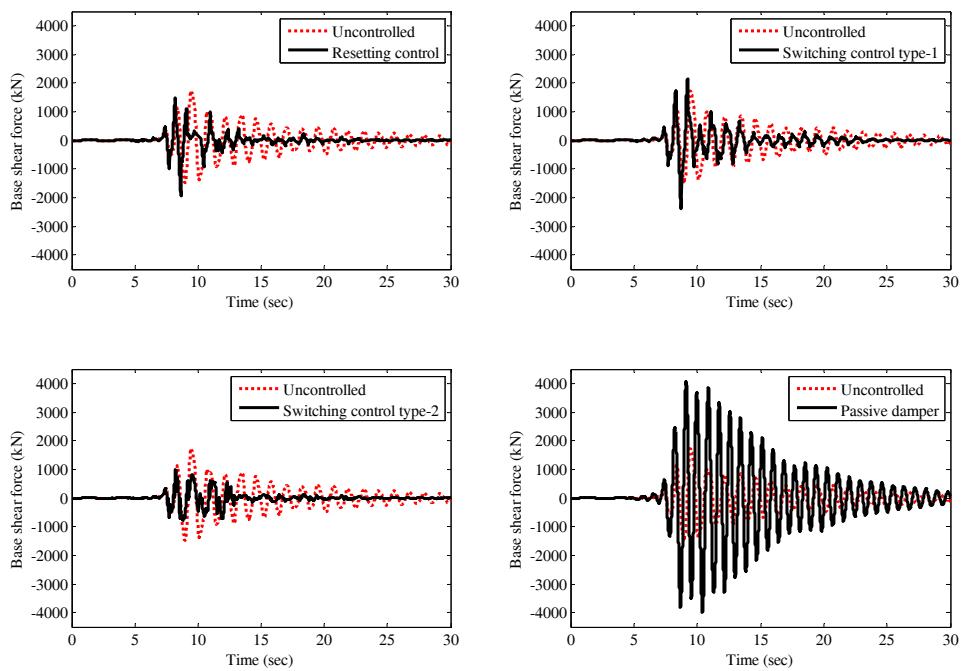
شکل ۶-۹ پاسخ زمانی برش پایه را برای $K_d=K$ نشان می‌دهد. همان طوری که در شکل مشاهده می‌شود روش کنترل غیرفعال مقدار برش پایه را به شدت افزایش داده است. روش کنترل قطع و وصل نوع ۱ تغییر چندانی در مقدار برش پایه ایجاد نکرده است اما روش کنترل باز تنظیمی به میزان اندکی برش پایه را کاهش داده است. بیشترین میزان کاهش برش پایه مربوط به روش کنترل قطع و وصل نوع ۲ است که به طور نسبتاً چشمگیری برش پایه را کاهش داده است.

به منظور نشان دادن عملکرد میراگر و نحوه باز تنظیم شدن آن در روش‌های مختلف کنترل، منحنی نیرو-تغییرمکان میراگر به همراه پاسخ زمانی جابجایی نسبی و پاسخ زمانی نیروی میراگر برای $K_d=K$ در تراز بام قاب ۵ طبقه در شکل ۶-۱۰ نشان داده شده است. همان طوری که در شکل مشاهده می‌شود، میراگر مطابق رفتار پیش‌بینی شده عمل کرده است. هر چند تعدادی باز تنظیم شدن‌های ناخواسته به خصوص در روش کنترل قطع و وصل نوع ۲ مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از وجود نقاط حداکثر یا حداقل محلی در پاسخ تغییرمکان نسبی طبقه باشد که الگوریتم کنترلی به کار رفته توانایی تشخیص آن را نداشته است. با این وجود تعداد این نقاط در حدی نیست که بتواند عملکرد کلی میراگر را تحت شعاع قرار دهد. با مقایسه شکل ۶-۱۰-الف با شکل ۶-۱۰-ب و شکل ۶-۱۰-ج مشاهده می‌شود که به دلیل میزان بالاتر استهلاک انرژی در روش کنترل باز تنظیمی، زوال تغییرمکان نسبی بام در این روش سریع‌تر از سایر روش‌های کنترل است و دامنه تغییرمکان در روش باز تنظیمی زودتر به صفر رسیده است.

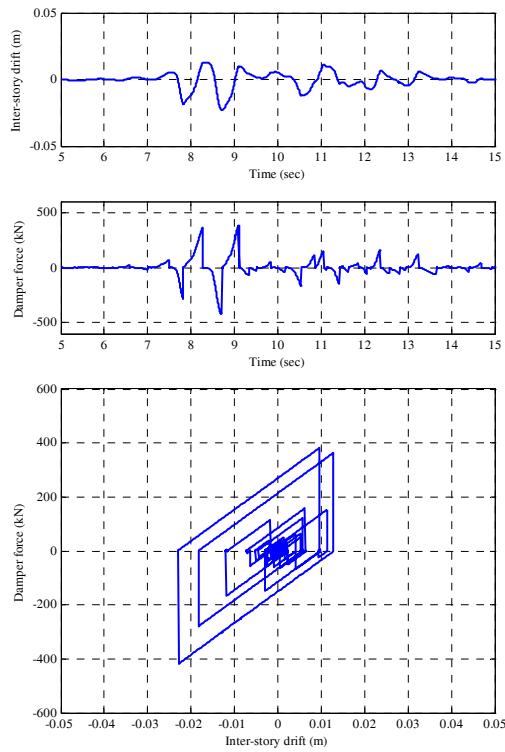


شکل ۶-۸- نیروی برشی حداقل طبقات تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA

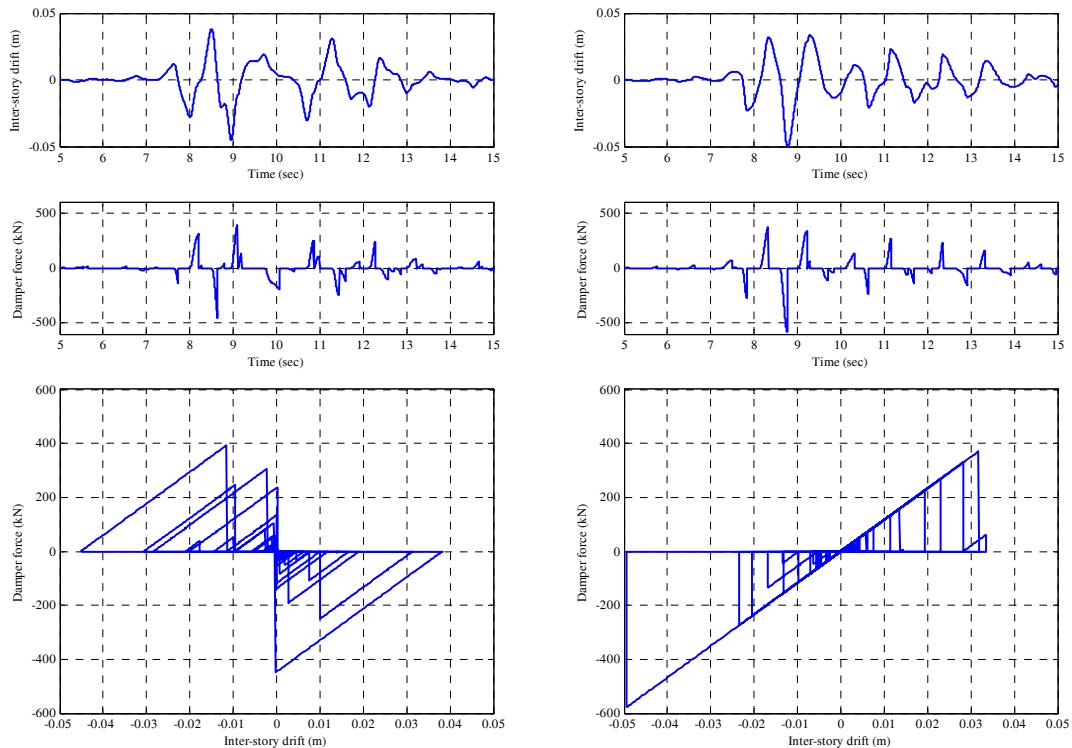
$K_d=K$ (ج) $K_d=0.5K$ (ب)



شکل ۶-۹- پاسخ زمانی برش پایه قاب ۵ طبقه تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA وقتی $K_d=K$



(الف)



(ج)

(ب)

شکل ۶-۱۰- پاسخ زمانی جابجایی نسبی، نیروی میراگر و منحنی نیرو-تغییرمکان میراگر در تراز بام

قابل ۵ طبقه تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA وقتی $K_d = K$; (الف) روش کنترل باز تنظیمی،

(ب) روش کنترل قطع و وصل نوع ۱، (ج) روش کنترل قطع و وصل نوع ۲.

۶-۳-۲- قاب ساختمانی ۱۰ طبقه

در این بخش نتایج تحلیل خطی قاب ۱۰ طبقه تحت زلزله‌های حوزه نزدیک مقیاس شده ارایه شده است. زمان تناوب سه مد اول قاب ۱۰ طبقه به ترتیب برابر ۱/۹۴ ثانیه، ۰/۷۷ ثانیه و ۰/۴۸ ثانیه است. پاسخ‌های حداکثر قاب ۱۰ طبقه در جداول ۱۵-۶ الی ۲۴-۶ ارایه شده است. با دقت در جداول ۱۵-۶ الی ۲۴-۶ نتایج زیر قابل استخراج است:

- تقریباً در تمام روش‌های کنترل مطالعه شده، جابجایی حداکثر و جابجایی نسبی حداکثر نسبت به حالت کنترل نشده کاهش یافته است. این میزان کاهش با افزایش نسبت K_d/K ، افزایش یافته است. تقریباً در تمام زلزله‌ها، بیشترین میزان کاهش جابجایی نسبی حداکثر قاب ۱۰ طبقه مربوط به روش کنترل باز تنظیمی بوده که بسته به نسبت K_d/K چیزی در حدود ۰/۶۰٪ کاهش داشته است. پس از آن روش کنترل قطع و وصل نوع ۱ بیشترین میزان کاهش جابجایی نسبی حداکثر را نشان می‌دهد که بسته به نسبت K_d/K چیزی در حدود ۰/۴۰٪-۰/۲۰٪ کاهش مشاهده می‌شود. روش کنترل قطع و وصل نوع ۲ با ۰/۳۰٪-۰/۱۵٪ کاهش پاسخ در رتبه بعدی قرار می‌گیرد. روش کنترل غیرفعال تنها روش کنترلی است که علاوه بر کاهش پاسخ جابجایی حداکثر و جابجایی نسبی حداکثر در اکثر زلزله‌ها، در برخی موارد باعث افزایش ۰/۲۵٪ تا ۰/۲۵٪ درصدی پاسخ جابجایی حداکثر قاب ۱۰ طبقه شده است. این موضوع می‌تواند به دلیل سخت‌تر شدن سازه در روش کنترل غیرفعال باشد که منجر به انتقال فرکانسی سازه به محدوده فرکانس غالب زلزله شده است.

- تقریباً تمام روش‌های کنترل باعث افزایش قابل توجه شتاب مطلق حداکثر قاب ۱۰ طبقه در اکثر زلزله‌ها شده‌اند که میزان این افزایش بسته به زلزله مورد مطالعه متفاوت است. این افزایش مخصوصاً هنگامی که نسبت $K_d/K=1$ است بسیار چشم‌گیر است.

- به جز روش کنترل غیرفعال، تمام روش‌های کنترل مطالعه شده باعث کاهش قابل توجه شتاب RMS قاب ۱۰ طبقه شده‌اند که این میزان کاهش، با افزایش نسبت K_d/K افزایش یافته است.

میزان کاهش شتاب RMS بسته به نسبت K_d/K و زلزله مورد مطالعه در روش کنترل باز تنظیمی در حدود ۲۰٪-۷۰٪، روش کنترل قطع و وصل نوع ۱ حدود ۵۵٪-۱۰٪ و در روش کنترل قطع و وصل نوع ۲ حدود ۶۰٪-۱۵٪ است.

▪ روش کنترل قطع و وصل نوع ۲ در تمام زلزله‌ها به جز زلزله لندرز، باعث کاهش نیروی برشی حداکثر قاب شده است و میزان کاهش با افزایش نسبت K_d/K ، افزایش یافته است. بیشترین میزان کاهش نیروی برشی حداکثر قاب برای نسبت‌های ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ به ترتیب برابر ۲۵٪، ۴۰٪ و ۵۵٪ است که مربوط به زلزله کوبه (ایستگاه تاکاتوری) است. سایر روش‌های کنترل به جز روش کنترل غیرفعال، در بیشتر زلزله‌ها نیروی برشی حداکثر قاب را کاهش داده‌اند.

جدول ۶-۱۵- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۱۰ طبقه تحت زلزله مندوسينو (۱۹۹۲) ایستگاه پترولیا.

Control Method	x_{max} (m)	$\frac{x_{max}^{con}}{x_{unc}^{max}}$	$Drift_{max}$ (m)	$\frac{Drift_{max}^{con}}{Drift_{unc}^{max}}$	a_{max} (m/s ²)	$\frac{a_{max}^{con}}{a_{unc}^{max}}$	a_{RMS} (m/s ²)	$\frac{a_{RMS}^{con}}{a_{unc}^{RMS}}$	Vb_{max} (kN)	$\frac{Vb_{max}^{con}}{Vb_{unc}^{max}}$	Fd_{max} (kN)	$\frac{Fd_{max}}{W_e}$
$K_d=0.25K$												
Resetting control	0.423	0.77	0.057	0.64	1.10	0.92	1.26	0.56	2400.5	0.84	678.3	9.3
Switching control type-1	0.449	0.82	0.061	0.68	1.18	0.99	1.55	0.68	2854.1	0.99	570.6	7.8
Switching control type-2	0.521	0.95	0.075	0.84	1.07	0.90	1.57	0.69	2563.3	0.89	640.9	8.8
Passive control	0.441	0.80	0.069	0.78	1.13	0.94	2.17	0.96	3308.1	1.15	661.6	9.1
Uncontrolled	0.548	---	0.089	---	1.19	---	2.26	---	2870.7	---	0.0	---
$K_d=0.5K$												
Resetting control	0.371	0.68	0.049	0.55	1.30	1.09	1.10	0.49	2345.6	0.82	963.5	13.2
Switching control type-1	0.416	0.76	0.055	0.61	1.21	1.01	1.38	0.61	2880.4	1.00	959.4	13.2
Switching control type-2	0.498	0.91	0.069	0.78	1.60	1.34	1.38	0.61	2330.2	0.81	1145.7	15.7
Passive control	0.395	0.72	0.056	0.64	1.16	0.97	2.77	1.22	3368.1	1.17	1122.7	15.4
Uncontrolled	0.548	---	0.089	---	1.19	---	2.26	---	2870.7	---	0.0	---
$K_d=K$												
Resetting control	0.298	0.54	0.038	0.43	1.97	1.65	1.00	0.44	2642.1	0.92	1531.9	21.0
Switching control type-1	0.359	0.66	0.046	0.52	1.85	1.55	1.22	0.54	2768.4	0.96	1381.9	19.0
Switching control type-2	0.469	0.85	0.069	0.78	2.03	1.71	1.30	0.57	2098.9	0.73	1574.4	21.6
Passive control	0.330	0.60	0.047	0.53	1.33	1.11	2.48	1.10	2933.8	1.02	1466.9	20.1
Uncontrolled	0.548	---	0.089	---	1.19	---	2.26	---	2870.7	---	0.0	---

جدول ۶-۱۶- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۱۰ طبقه تحت زلزله ارزینکان (۱۹۹۲) ایستگاه ارزینکان.

Control Method	x_{max} (m)	$\frac{x_{max}^{con}}{x_{unc}^{max}}$	$Drift_{max}$ (m)	$\frac{Drift_{max}^{con}}{Drift_{unc}^{max}}$	a_{max} (m/s ²)	$\frac{a_{max}^{con}}{a_{unc}^{max}}$	a_{RMS} (m/s ²)	$\frac{a_{RMS}^{con}}{a_{unc}^{RMS}}$	Vb_{max} (kN)	$\frac{Vb_{max}^{con}}{Vb_{unc}^{max}}$	Fd_{max} (kN)	$\frac{Fd_{max}}{W_e}$
$K_d=0.25K$												
Resetting control	0.511	0.64	0.065	0.64	1.24	1.05	1.78	0.43	2323.7	0.73	911.4	12.5
Switching control type-1	0.641	0.80	0.080	0.78	1.29	1.10	2.67	0.64	2801.6	0.88	560.4	7.7
Switching control type-2	0.671	0.84	0.086	0.84	1.30	1.11	2.53	0.61	2859.6	0.89	716.0	9.8
Passive control	0.673	0.84	0.085	0.83	1.21	1.02	3.75	0.90	3398.7	1.06	679.7	9.3
Uncontrolled	0.802	---	0.102	---	1.18	---	4.16	---	3195.5	---	0.0	---
$K_d=0.5K$												
Resetting control	0.417	0.52	0.052	0.51	1.67	1.41	1.50	0.36	2350.8	0.74	1314.2	18.1
Switching control type-1	0.543	0.68	0.068	0.67	1.25	1.06	2.20	0.53	2732.9	0.86	908.1	12.5
Switching control type-2	0.619	0.77	0.078	0.77	1.77	1.50	1.97	0.47	2716.8	0.85	1360.3	18.7
Passive control	0.548	0.68	0.070	0.68	1.19	1.00	3.64	0.87	3364.9	1.05	1121.6	15.4
Uncontrolled	0.802	---	0.102	---	1.18	---	4.16	---	3195.5	---	0.0	---
$K_d=K$												
Resetting control	0.287	0.36	0.036	0.36	2.68	2.27	1.21	0.29	2986.9	0.93	2106.5	28.9
Switching control type-1	0.471	0.59	0.060	0.59	1.79	1.52	1.93	0.46	2841.5	0.89	1421.5	19.5
Switching control type-2	0.503	0.63	0.063	0.62	2.92	2.47	1.56	0.37	2423.8	0.76	2253.5	31.0
Passive control	0.460	0.57	0.057	0.56	1.22	1.04	2.88	0.69	3581.4	1.12	1790.7	24.6
Uncontrolled	0.802	---	0.102	---	1.18	---	4.16	---	3195.5	---	0.0	---

جدول ۶-۱۷- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۱۰ طبقه تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA

Control Method	x_{max} (m)	$\frac{x_{max}^{con}}{x_{max}^{unc}}$	$Drift_{max}$ (m)	$\frac{Drift_{max}^{con}}{Drift_{max}^{unc}}$	a_{max} (m/s ²)	$\frac{a_{max}^{con}}{a_{max}^{unc}}$	a_{RMS} (m/s ²)	$\frac{a_{RMS}^{con}}{a_{RMS}^{unc}}$	Vb_{max} (kN)	$\frac{Vb_{max}^{con}}{Vb_{max}^{unc}}$	Fd_{max} (kN)	$\frac{Fd_{max}}{W_e}$
K_d=0.25K												
Resetting control	0.290	0.79	0.037	0.56	0.88	0.99	1.35	0.59	1386.3	0.77	478.3	6.6
Switching control type-1	0.357	0.98	0.049	0.75	0.97	1.08	1.79	0.79	1793.7	1.00	358.2	4.9
Switching control type-2	0.340	0.93	0.060	0.91	0.77	0.86	1.60	0.70	1537.0	0.86	384.8	5.3
Passive control	0.416	1.14	0.063	0.95	1.07	1.19	2.60	1.14	2349.0	1.31	469.8	6.5
Uncontrolled	0.365	---	0.066	---	0.90	---	2.28	---	1796.3	---	0.0	---
K_d=0.5K												
Resetting control	0.229	0.63	0.030	0.46	0.89	0.99	1.19	0.52	1346.0	0.75	710.4	9.8
Switching control type-1	0.327	0.90	0.041	0.62	1.06	1.18	1.61	0.71	1736.7	0.97	578.2	7.9
Switching control type-2	0.334	0.91	0.053	0.81	0.88	0.98	1.39	0.61	1185.2	0.66	449.7	6.2
Passive control	0.458	1.25	0.060	0.92	1.06	1.18	2.63	1.15	2772.1	1.54	924.0	12.7
Uncontrolled	0.365	---	0.066	---	0.90	---	2.28	---	1796.3	---	0.0	---
K_d=K												
Resetting control	0.166	0.45	0.024	0.37	1.38	1.54	1.06	0.47	1477.0	0.82	1063.1	14.6
Switching control type-1	0.280	0.77	0.038	0.57	1.16	1.30	1.45	0.64	1740.1	0.97	868.0	11.9
Switching control type-2	0.277	0.76	0.044	0.68	1.40	1.56	1.15	0.50	1095.6	0.61	1094.3	15.0
Passive control	0.397	1.09	0.051	0.77	1.08	1.20	3.18	1.39	3589.9	2.00	1794.9	24.7
Uncontrolled	0.365	---	0.066	---	0.90	---	2.28	---	1796.3	---	0.0	---

جدول ۶-۱۸- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۱۰ طبقه تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه تاکاتوری.

Control Method	x_{max} (m)	$\frac{x_{max}^{con}}{x_{max}^{unc}}$	$Drift_{max}$ (m)	$\frac{Drift_{max}^{con}}{Drift_{max}^{unc}}$	a_{max} (m/s ²)	$\frac{a_{max}^{con}}{a_{max}^{unc}}$	a_{RMS} (m/s ²)	$\frac{a_{RMS}^{con}}{a_{RMS}^{unc}}$	Vb_{max} (kN)	$\frac{Vb_{max}^{con}}{Vb_{max}^{unc}}$	Fd_{max} (kN)	$\frac{Fd_{max}}{W_e}$
K_d=0.25K												
Resetting control	0.498	0.45	0.064	0.48	1.46	1.16	1.96	0.41	3031.3	0.66	951.0	13.1
Switching control type-1	0.730	0.65	0.089	0.66	1.13	0.90	2.82	0.59	3785.3	0.82	756.8	10.4
Switching control type-2	0.832	0.75	0.101	0.75	1.24	0.99	2.85	0.60	3480.0	0.75	871.3	12.0
Passive control	0.703	0.63	0.083	0.62	0.97	0.77	3.13	0.66	3714.8	0.80	743.0	10.2
Uncontrolled	1.116	---	0.134	---	1.25	---	4.75	---	4620.8	---	0.0	---
K_d=0.5K												
Resetting control	0.408	0.37	0.051	0.38	2.03	1.62	1.65	0.35	2824.6	0.61	1456.2	20.0
Switching control type-1	0.578	0.52	0.070	0.52	1.64	1.31	2.26	0.48	3398.0	0.74	1131.0	15.5
Switching control type-2	0.670	0.60	0.085	0.63	1.83	1.47	2.28	0.48	2792.2	0.60	1374.8	18.9
Passive control	0.525	0.47	0.064	0.47	1.11	0.88	3.70	0.78	3188.5	0.69	1062.8	14.6
Uncontrolled	1.116	---	0.134	---	1.25	---	4.75	---	4620.8	---	0.0	---
K_d=K												
Resetting control	0.299	0.27	0.036	0.27	2.64	2.11	1.39	0.29	2997.4	0.65	2010.4	27.6
Switching control type-1	0.472	0.42	0.058	0.43	2.42	1.93	2.03	0.43	3529.6	0.76	1764.3	24.2
Switching control type-2	0.561	0.50	0.075	0.56	2.71	2.16	1.93	0.41	2089.0	0.45	2086.8	28.7
Passive control	0.824	0.74	0.097	0.72	1.69	1.35	4.25	0.89	7135.6	1.54	3567.8	49.0
Uncontrolled	1.116	---	0.134	---	1.25	---	4.75	---	4620.8	---	0.0	---

جدول ۶-۱۹- پاسخهای حداکثر قاب ساختمانی ۱۰ طبقه تحت زلزله لندرز (۱۹۹۲) ایستگاه لاسرن.

Control Method	x_{max} (m)	$\frac{x_{max}^{con}}{x_{max}^{unc}}$	$Drift_{max}$ (m)	$\frac{Drift_{max}^{con}}{Drift_{max}^{unc}}$	a_{max} (m/s ²)	$\frac{a_{max}^{con}}{a_{max}^{unc}}$	a_{RMS} (m/s ²)	$\frac{a_{RMS}^{con}}{a_{RMS}^{unc}}$	Vb_{max} (kN)	$\frac{Vb_{max}^{con}}{Vb_{max}^{unc}}$	Fd_{max} (kN)	$\frac{Fd_{max}}{W_e}$
$K_d=0.25K$												
Resetting control	0.184	0.90	0.023	0.84	0.43	1.01	0.60	0.83	918.9	1.07	169.0	2.3
Switching control type-1	0.185	0.91	0.022	0.81	0.44	1.03	0.65	0.90	895.4	1.04	123.9	1.7
Switching control type-2	0.211	1.03	0.027	0.99	0.55	1.29	0.62	0.85	874.3	1.02	208.9	2.9
Passive control	0.177	0.87	0.024	0.88	0.47	1.09	0.91	1.26	1127.1	1.31	225.4	3.1
Uncontrolled	0.204	---	0.027	---	0.43	---	0.72	---	860.1	---	0.0	---
$K_d=0.5K$												
Resetting control	0.183	0.90	0.022	0.81	0.44	1.03	0.58	0.80	919.4	1.07	221.0	3.0
Switching control type-1	0.180	0.88	0.022	0.80	0.44	1.04	0.63	0.88	903.2	1.05	184.1	2.5
Switching control type-2	0.215	1.05	0.027	1.00	0.44	1.03	0.61	0.84	900.1	1.05	240.2	3.3
Passive control	0.185	0.91	0.024	0.89	0.66	1.55	1.16	1.60	1381.8	1.61	460.6	6.3
Uncontrolled	0.204	---	0.027	---	0.43	---	0.72	---	860.1	---	0.0	---
$K_d=K$												
Resetting control	0.175	0.86	0.021	0.79	0.43	1.01	0.59	0.81	1052.4	1.22	400.6	5.5
Switching control type-1	0.174	0.86	0.021	0.80	0.47	1.11	0.62	0.86	1024.4	1.19	377.2	5.2
Switching control type-2	0.218	1.07	0.027	0.99	0.71	1.67	0.58	0.80	911.5	1.06	411.6	5.7
Passive control	0.174	0.86	0.022	0.80	0.59	1.38	1.02	1.40	1600.5	1.86	800.3	11.0
Uncontrolled	0.204	---	0.027	---	0.43	---	0.72	---	860.1	---	0.0	---

جدول ۶-۲۰- پاسخهای حداکثر قاب ساختمانی ۱۰ طبقه تحت زلزله لوماپریتا (۱۹۸۹) ایستگاه سد لگزینگتون

Control Method	x_{max} (m)	$\frac{x_{max}^{con}}{x_{max}^{unc}}$	$Drift_{max}$ (m)	$\frac{Drift_{max}^{con}}{Drift_{max}^{unc}}$	a_{max} (m/s ²)	$\frac{a_{max}^{con}}{a_{max}^{unc}}$	a_{RMS} (m/s ²)	$\frac{a_{RMS}^{con}}{a_{RMS}^{unc}}$	Vb_{max} (kN)	$\frac{Vb_{max}^{con}}{Vb_{max}^{unc}}$	Fd_{max} (kN)	$\frac{Fd_{max}}{W_e}$
$K_d=0.25K$												
Resetting control	0.545	0.70	0.070	0.66	1.29	0.88	1.99	0.64	2625.1	1.04	840.2	11.5
Switching control type-1	0.686	0.88	0.093	0.87	1.63	1.11	2.55	0.82	2691.3	1.07	537.8	7.4
Switching control type-2	0.688	0.89	0.095	0.89	1.15	0.79	2.30	0.74	2329.1	0.93	577.2	7.9
Passive control	0.723	0.93	0.094	0.87	1.45	0.99	3.71	1.19	3119.7	1.24	623.9	8.6
Uncontrolled	0.777	---	0.107	---	1.47	---	3.11	---	2516.2	---	0.0	---
$K_d=0.5K$												
Resetting control	0.417	0.54	0.055	0.51	1.85	1.26	1.84	0.59	2731.7	1.09	1449.4	19.9
Switching control type-1	0.629	0.81	0.088	0.82	1.92	1.30	2.39	0.77	2823.8	1.12	941.2	12.9
Switching control type-2	0.610	0.79	0.087	0.81	1.52	1.04	2.02	0.65	2204.5	0.88	1104.9	15.2
Passive control	0.631	0.81	0.079	0.74	1.35	0.92	3.83	1.23	3563.2	1.42	1187.7	16.3
Uncontrolled	0.777	---	0.107	---	1.47	---	3.11	---	2516.2	---	0.0	---
$K_d=K$												
Resetting control	0.284	0.37	0.036	0.34	2.82	1.92	1.71	0.55	3111.1	1.24	2189.8	30.1
Switching control type-1	0.527	0.68	0.073	0.68	2.38	1.62	2.28	0.73	3258.7	1.30	1628.7	22.4
Switching control type-2	0.438	0.56	0.062	0.57	2.72	1.85	1.73	0.56	2094.6	0.83	2093.9	28.8
Passive control	0.605	0.78	0.074	0.69	1.62	1.11	4.50	1.45	4687.4	1.86	2343.7	32.2
Uncontrolled	0.777	---	0.107	---	1.47	---	3.11	---	2516.2	---	0.0	---

جدول ۶-۲۱- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۱۰ طبقه تحت زلزله لوماپریتا (۱۹۸۹) ایستگاه لس‌گاتوس.

Control Method	x_{max} (m)	$\frac{x_{max}^{con}}{x_{max}^{unc}}$	$Drift_{max}$ (m)	$\frac{Drift_{max}^{con}}{Drift_{max}^{unc}}$	a_{max} (m/s ²)	$\frac{a_{max}^{con}}{a_{max}^{unc}}$	a_{RMS} (m/s ²)	$\frac{a_{RMS}^{con}}{a_{RMS}^{unc}}$	Vb_{max} (kN)	$\frac{Vb_{max}^{con}}{Vb_{max}^{unc}}$	Fd_{max} (kN)	$\frac{Fd_{max}}{W_e}$
$K_d=0.25K$												
Resetting control	0.530	0.69	0.067	0.62	1.14	0.72	2.11	0.56	2779.8	0.86	827.6	11.4
Switching control type-1	0.627	0.82	0.083	0.77	1.56	0.98	2.93	0.78	3095.9	0.96	617.9	8.5
Switching control type-2	0.737	0.96	0.096	0.89	1.33	0.84	2.47	0.66	2730.1	0.84	654.9	9.0
Passive control	0.901	1.17	0.125	1.16	1.91	1.20	5.20	1.39	4858.2	1.50	971.6	13.3
Uncontrolled	0.768	---	0.108	---	1.58	---	3.74	---	3231.1	---	0.0	---
$K_d=0.5K$												
Resetting control	0.407	0.53	0.051	0.48	1.61	1.02	1.76	0.47	2707.0	0.84	1287.9	17.7
Switching control type-1	0.537	0.70	0.082	0.76	1.43	0.91	2.61	0.70	3110.2	0.96	1036.5	14.2
Switching control type-2	0.704	0.92	0.090	0.84	1.62	1.03	2.08	0.56	2463.4	0.76	1082.0	14.9
Passive control	0.878	1.14	0.115	1.06	2.07	1.31	5.18	1.39	5304.3	1.64	1768.1	24.3
Uncontrolled	0.768	---	0.108	---	1.58	---	3.74	---	3231.1	---	0.0	---
$K_d=K$												
Resetting control	0.279	0.36	0.035	0.33	2.57	1.62	1.49	0.40	2924.8	0.91	1969.6	27.1
Switching control type-1	0.489	0.64	0.066	0.62	1.97	1.24	2.32	0.62	3096.8	0.96	1530.4	21.0
Switching control type-2	0.657	0.86	0.085	0.79	2.64	1.67	1.82	0.49	2366.0	0.73	1868.7	25.7
Passive control	0.511	0.67	0.064	0.60	1.36	0.86	3.67	0.98	4035.2	1.25	2017.6	27.7
Uncontrolled	0.768	---	0.108	---	1.58	---	3.74	---	3231.1	---	0.0	---

جدول ۶-۲۲- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۱۰ طبقه تحت زلزله نورث‌ریدج (۱۹۹۴) ایستگاه رینالدی.

Control Method	x_{max} (m)	$\frac{x_{max}^{con}}{x_{max}^{unc}}$	$Drift_{max}$ (m)	$\frac{Drift_{max}^{con}}{Drift_{max}^{unc}}$	a_{max} (m/s ²)	$\frac{a_{max}^{con}}{a_{max}^{unc}}$	a_{RMS} (m/s ²)	$\frac{a_{RMS}^{con}}{a_{RMS}^{unc}}$	Vb_{max} (kN)	$\frac{Vb_{max}^{con}}{Vb_{max}^{unc}}$	Fd_{max} (kN)	$\frac{Fd_{max}}{W_e}$
$K_d=0.25K$												
Resetting control	0.344	0.78	0.049	0.64	0.99	1.00	1.65	0.60	1406.5	0.81	472.9	6.5
Switching control type-1	0.407	0.92	0.061	0.80	1.16	1.17	2.02	0.74	1662.4	0.96	331.7	4.6
Switching control type-2	0.395	0.90	0.066	0.87	0.90	0.91	2.01	0.74	1365.5	0.79	319.4	4.4
Passive control	0.423	0.96	0.067	0.87	1.07	1.08	2.38	0.87	2144.2	1.24	428.8	5.9
Uncontrolled	0.440	---	0.076	---	0.99	---	2.73	---	1730.9	---	0.0	---
$K_d=0.5K$												
Resetting control	0.289	0.66	0.041	0.54	0.97	0.98	1.51	0.55	1499.3	0.87	835.6	11.5
Switching control type-1	0.383	0.87	0.059	0.78	1.25	1.26	1.84	0.67	1830.0	1.06	609.6	8.4
Switching control type-2	0.375	0.85	0.060	0.79	0.90	0.91	1.78	0.65	1278.0	0.74	641.0	8.8
Passive control	0.403	0.92	0.059	0.77	1.09	1.10	2.91	1.06	2465.7	1.42	821.9	11.3
Uncontrolled	0.440	---	0.076	---	0.99	---	2.73	---	1730.9	---	0.0	---
$K_d=K$												
Resetting control	0.219	0.50	0.031	0.41	1.72	1.74	1.35	0.49	1910.0	1.10	1386.6	19.0
Switching control type-1	0.347	0.79	0.055	0.73	1.37	1.39	1.73	0.63	1735.7	1.00	865.7	11.9
Switching control type-2	0.312	0.71	0.048	0.63	1.58	1.60	1.56	0.57	1280.4	0.74	1279.1	17.6
Passive control	0.463	1.05	0.056	0.74	1.15	1.16	5.02	1.84	3761.8	2.17	1880.9	25.8
Uncontrolled	0.440	---	0.076	---	0.99	---	2.73	---	1730.9	---	0.0	---

جدول ۶-۲۳- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۱۰ طبقه تحت زلزله نورثridج (۱۹۹۴) ایستگاه اولیویو.

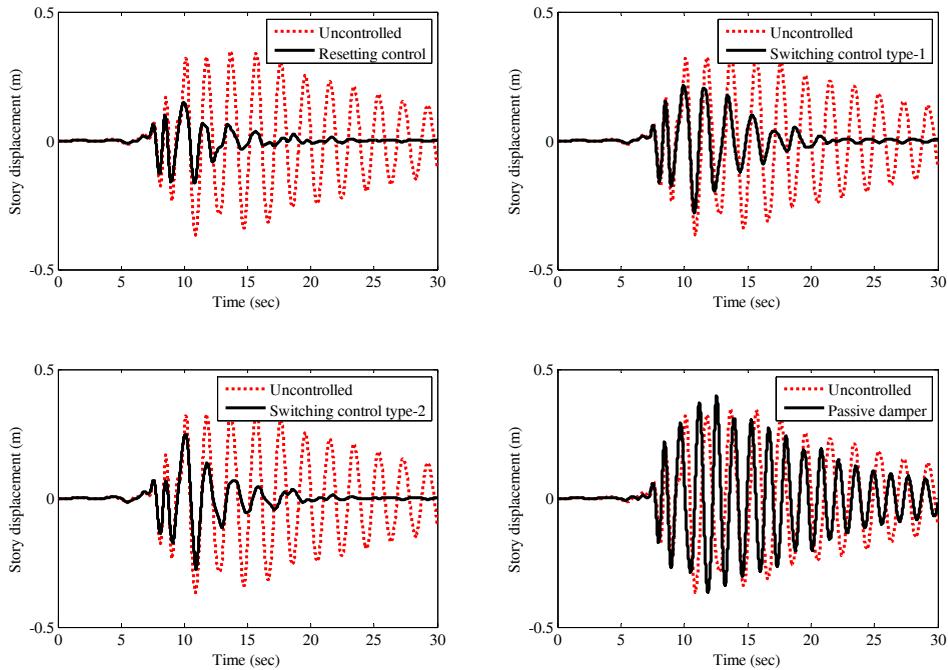
Control Method	x_{max} (m)	$\frac{x_{max}^{con}}{x_{max}^{unc}}$	$Drift_{max}$ (m)	$\frac{Drift_{max}^{con}}{Drift_{max}^{unc}}$	a_{max} (m/s ²)	$\frac{a_{max}^{con}}{a_{max}^{unc}}$	a_{RMS} (m/s ²)	$\frac{a_{RMS}^{con}}{a_{RMS}^{unc}}$	Vb_{max} (kN)	$\frac{Vb_{max}^{con}}{Vb_{max}^{unc}}$	Fd_{max} (kN)	$\frac{Fd_{max}}{W_e}$
$K_d=0.25K$												
Resetting control	0.344	0.72	0.040	0.69	0.77	1.17	1.17	0.57	1756.8	0.88	587.7	8.1
Switching control type-1	0.385	0.80	0.047	0.80	0.71	1.08	1.38	0.68	2019.3	1.01	403.0	5.5
Switching control type-2	0.417	0.87	0.050	0.86	0.63	0.96	1.49	0.73	1738.3	0.87	434.9	6.0
Passive control	0.413	0.86	0.050	0.87	0.76	1.15	1.81	0.89	2287.3	1.14	457.5	6.3
Uncontrolled	0.480	---	0.058	---	0.66	---	2.04	---	2001.5	---	0.0	---
$K_d=0.5K$												
Resetting control	0.305	0.64	0.036	0.63	1.12	1.70	1.03	0.51	1594.0	0.80	895.3	12.3
Switching control type-1	0.350	0.73	0.041	0.71	0.91	1.38	1.27	0.62	1911.6	0.96	637.3	8.8
Switching control type-2	0.406	0.85	0.051	0.89	1.10	1.67	1.32	0.65	1523.3	0.76	739.5	10.2
Passive control	0.365	0.76	0.045	0.77	0.86	1.31	3.04	1.49	2528.6	1.26	842.9	11.6
Uncontrolled	0.480	---	0.058	---	0.66	---	2.04	---	2001.5	---	0.0	---
$K_d=K$												
Resetting control	0.254	0.53	0.030	0.51	1.47	2.24	0.86	0.42	1934.5	0.97	1155.1	15.9
Switching control type-1	0.314	0.66	0.037	0.64	1.28	1.95	1.15	0.57	2044.2	1.02	1020.8	14.0
Switching control type-2	0.394	0.82	0.053	0.92	1.46	2.21	1.21	0.60	1409.1	0.70	1053.9	14.5
Passive control	0.348	0.73	0.044	0.76	0.94	1.42	3.05	1.50	2985.6	1.49	1492.8	20.5
Uncontrolled	0.480	---	0.058	---	0.66	---	2.04	---	2001.5	---	0.0	---

جدول ۶-۲۴- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۱۰ طبقه تحت زلزله طبس (۱۹۷۸) ایستگاه طبس.

Control Method	x_{max} (m)	$\frac{x_{max}^{con}}{x_{max}^{unc}}$	$Drift_{max}$ (m)	$\frac{Drift_{max}^{con}}{Drift_{max}^{unc}}$	a_{max} (m/s ²)	$\frac{a_{max}^{con}}{a_{max}^{unc}}$	a_{RMS} (m/s ²)	$\frac{a_{RMS}^{con}}{a_{RMS}^{unc}}$	Vb_{max} (kN)	$\frac{Vb_{max}^{con}}{Vb_{max}^{unc}}$	Fd_{max} (kN)	$\frac{Fd_{max}}{W_e}$
$K_d=0.25K$												
Resetting control	0.261	0.64	0.033	0.59	0.68	0.89	0.88	0.49	1491.1	0.82	356.5	4.9
Switching control type-1	0.285	0.69	0.036	0.64	0.69	0.90	1.14	0.64	1672.9	0.92	334.4	4.6
Switching control type-2	0.318	0.77	0.043	0.76	0.67	0.88	1.12	0.62	1593.4	0.88	356.5	4.9
Passive control	0.250	0.61	0.034	0.60	0.65	0.86	1.52	0.85	1450.0	0.80	290.0	4.0
Uncontrolled	0.410	---	0.056	---	0.76	---	1.79	---	1819.5	---	0.0	---
$K_d=0.5K$												
Resetting control	0.219	0.53	0.026	0.46	0.69	0.91	0.76	0.42	1457.0	0.80	565.4	7.8
Switching control type-1	0.248	0.60	0.030	0.53	0.79	1.04	0.99	0.55	1647.0	0.91	547.8	7.5
Switching control type-2	0.305	0.74	0.039	0.70	0.78	1.02	0.96	0.53	1400.0	0.77	561.6	7.7
Passive control	0.205	0.50	0.027	0.49	0.69	0.90	1.41	0.79	1513.0	0.83	504.3	6.9
Uncontrolled	0.410	---	0.056	---	0.76	---	1.79	---	1819.5	---	0.0	---
$K_d=K$												
Resetting control	0.183	0.45	0.024	0.43	0.89	1.16	0.71	0.40	1322.0	0.73	773.3	10.6
Switching control type-1	0.218	0.53	0.026	0.46	1.01	1.33	0.91	0.51	1521.7	0.84	759.9	10.4
Switching control type-2	0.285	0.69	0.037	0.66	0.95	1.26	0.85	0.47	1262.0	0.69	822.3	11.3
Passive control	0.234	0.57	0.031	0.55	0.79	1.04	1.88	1.05	2143.9	1.18	1071.9	14.7
Uncontrolled	0.410	---	0.056	---	0.76	---	1.79	---	1819.5	---	0.0	---

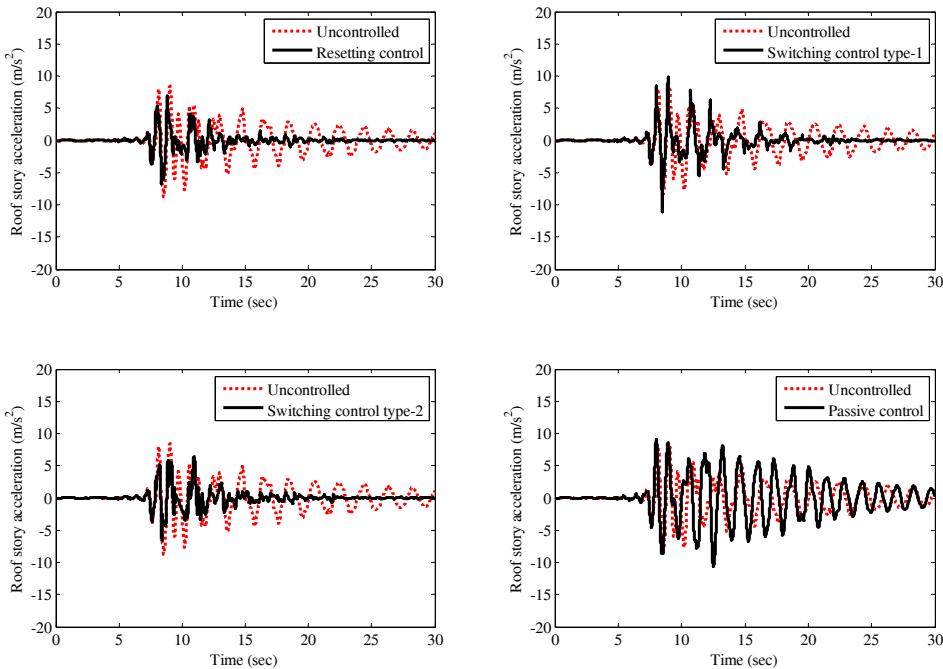
در ادامه گراف‌های پاسخ قاب ۱۰ طبقه برای روش‌های مختلف کنترل تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA به عنوان نمونه ارایه شده است.

شکل ۶-۱۱ پاسخ زمانی جابجایی بام برای روش‌های مختلف کنترل در مقایسه با حالت کنترل نشده (برای $K_d=K$) را نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود دامنه جابجایی بام تقریباً برای تمام روش‌های کنترل نسبت به حالت کنترل نشده کاهش یافته است هرچند میزان کاهش برای روش‌های مختلف متفاوت است. بیشترین میزان کاهش مربوط به روش کنترل باز تنظیمی است که عملأً پس از ۶ سیکل، دامنه جابجایی به صفر رسیده است. پس از آن به ترتیب روش کنترل قطع و وصل نوع ۲ و روش کنترل قطع و وصل نوع ۱ بیشترین میزان کاهش را داشته‌اند. در روش کنترل غیرفعال هم اندکی کاهش در جابجایی بام مشاهده می‌شود.



شکل ۶-۱۱- پاسخ زمانی جابجایی بام قاب ۱۰ طبقه تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA وقتی $K_d=K$

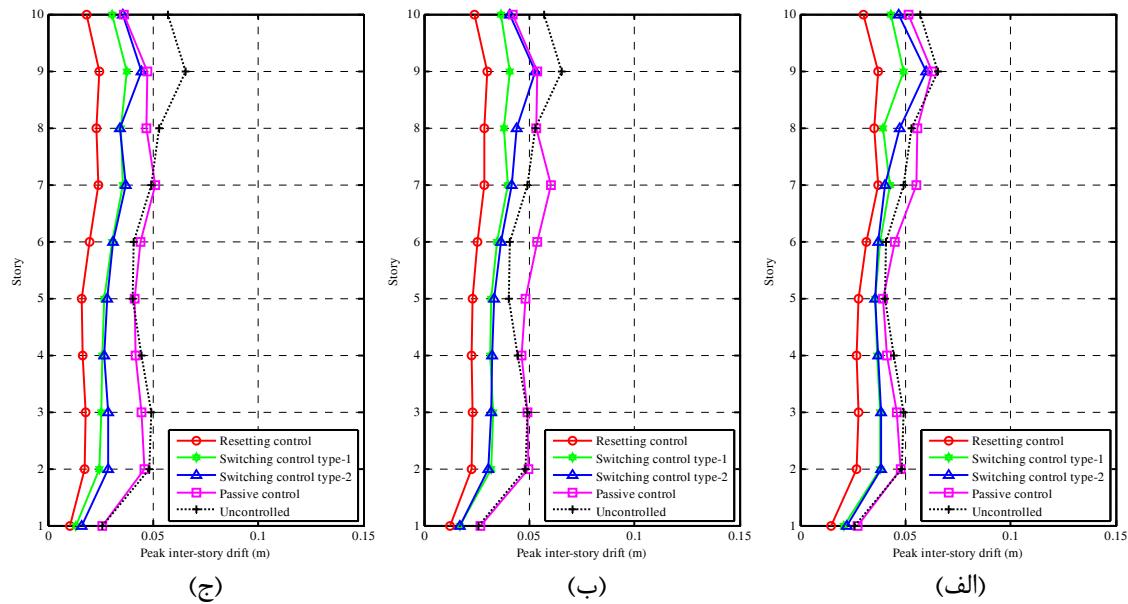
در شکل ۶-۱۲ پاسخ زمانی شتاب بام برای $K_d=K$ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود روش کنترل باز تنظیمی و روش کنترل قطع و وصل نوع ۲ اندکی شتاب بام را کاهش داده‌اند. با این حال روش کنترل قطع و وصل نوع ۱ اندکی شتاب بام را افزایش داده است. این در حالیست که روش کنترل غیرفعال باعث افزایش شتاب بام نسبت به حالت کنترل نشده شده است.



شکل ۶-۱۲- پاسخ زمانی شتاب مطلق بام قاب ۱۰ طبقه تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA

$$K_d = K$$

در شکل ۶-۱۳ جابجایی نسبی طبقات برای روش‌های مختلف کنترل و نسبت‌های متفاوت K_d/K ارایه شده است. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود بیشترین میزان کاهش پاسخ جابجایی نسبی طبقات مربوط به روش کنترل باز تنظیمی است که با افزایش نسبت K_d/K ، میزان کاهش پاسخ نیز افزایش می‌یابد. عملکرد روش‌های کنترل قطع و وصل نوع ۱ و قطع و وصل نوع ۲ تقریباً یکسان است و هر دو باعث کاهش جابجایی نسبی طبقات به خصوص در نسبت‌های بالاتر K_d/K شده‌اند. با این حال، روش کنترل غیرفعال تأثیر چندانی در کاهش پاسخ نداشته است. علاوه بر این برای نسبت‌های K_d/K بزرگ‌تر، روش‌های کنترل باز تنظیمی، قطع و وصل نوع ۱ و قطع و وصل نوع ۲ باعث توزیع یکنواخت‌تر جابجایی نسبی در ارتفاع قاب ۱۰ طبقه شده است. این رفتار تقریباً در مورد تمام زلزله‌های مطالعه شده مشاهده شده است.



شکل ۶-۱۳- جابجایی نسبی تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA؛ (الف) $K_d = 0.25K$ ، (ب)

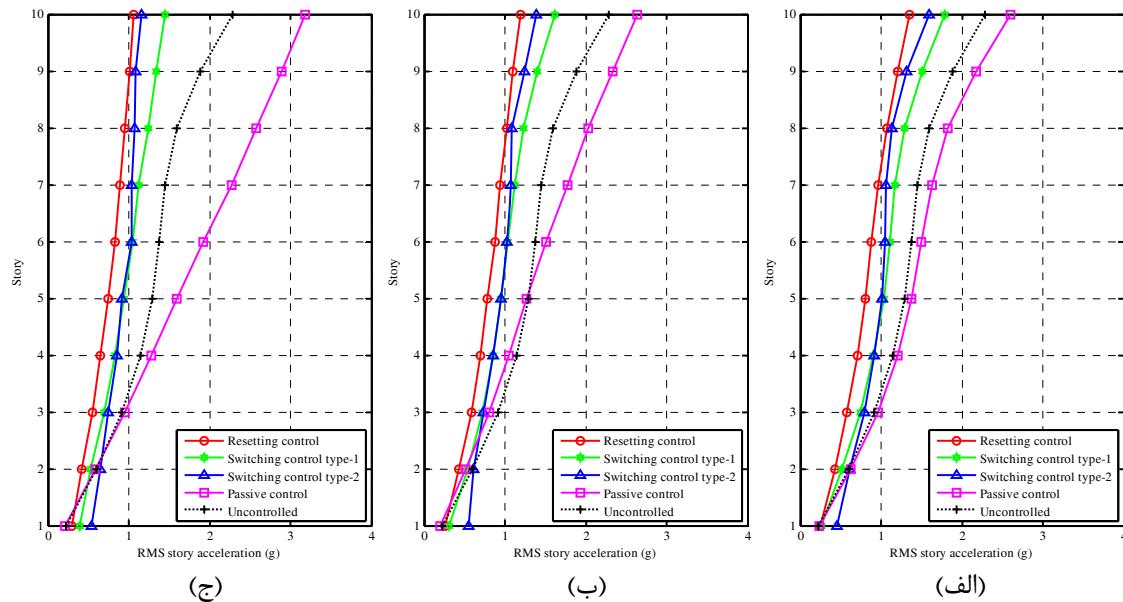
. $K_d = K$ ، (ج) $K_d = 0.5K$

شکل ۶-۱۴- شتاب RMS طبقات را برای روش‌های مختلف کنترل نشان می‌دهد. همان‌طور

که در شکل نشان داده شده، هر سه روش کنترل باز تنظیمی، قطع و وصل نوع ۱ و روش کنترل قطع و وصل نوع ۲ تقریباً به یک میزان مقدار شتاب RMS طبقات قاب ۱۰ طبقه را کاهش داده‌اند و میزان کاهش شتاب در طبقات بالا بیش از طبقات پایین است و این میزان با افزایش نسبت K_d/K افزایش یافته است. این در حالیست که روش کنترل غیرفعال باعث افزایش شتاب RMS طبقات نسبت به حالت کنترل نشده شده است و با افزایش نسبت K_d/K شتاب RMS طبقات نیز افزایش یافته است.

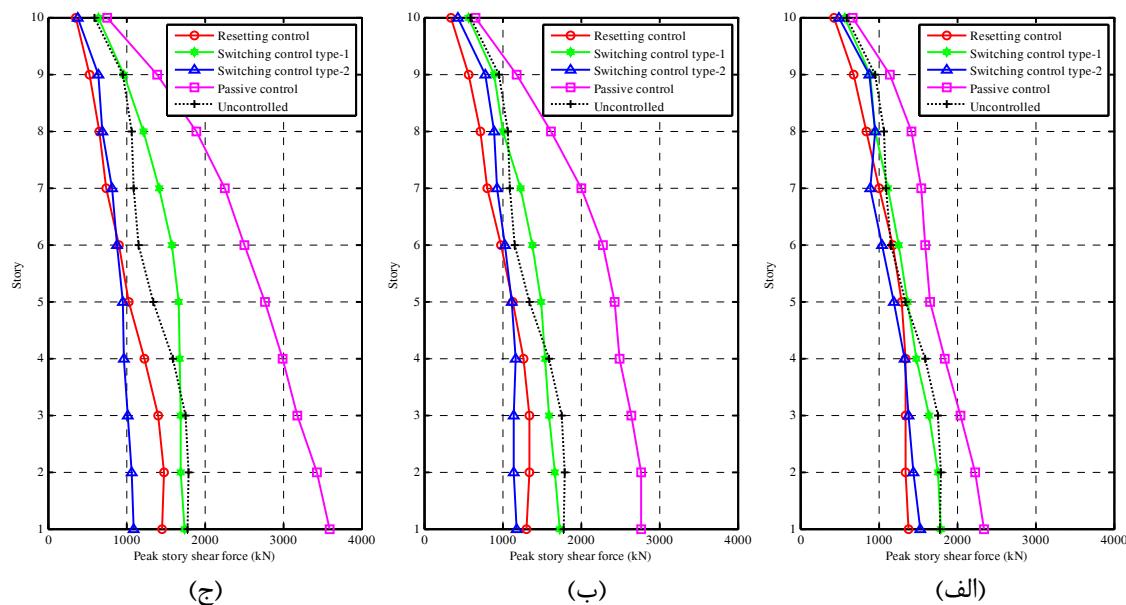
در شکل ۶-۱۵ نیروی برشی حداکثر طبقات برای روش‌های مختلف کنترل ارایه شده است.

همان‌طوری که در شکل مشاهده می‌شود روش کنترل قطع و وصل نوع ۱ باعث افزایش نیروی برشی طبقه در طبقات بالا شده است، در حالی که تأثیر چندانی بر طبقات پایین نداشته است. روش‌های کنترل باز تنظیمی و قطع و وصل نوع ۲ باعث کاهش نیروی برشی حداکثر طبقات به خصوص در طبقات پایین شده‌اند و این کاهش با افزایش نسبت K_d/K زیادتر شده است. این در حالیست که روش کنترل غیرفعال باعث افزایش قابل توجه نیروی برشی حداکثر طبقات شده است. نکته قابل توجه در این شکل یکنواخت شدن توزیع نیروی برشی حداکثر در ارتفاع قاب ۱۰ طبقه در روش کنترل قطع و وصل نوع ۲ است که برای مقادیر بزرگ‌تر K_d/K مشهودتر است.



شکل ۶-۱۴- شتاب RMS طبقات تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA؛ (الف) . $K_d=0.25K$ ، (ب)

. $K_d=K$ (ج) . $K_d=0.5K$



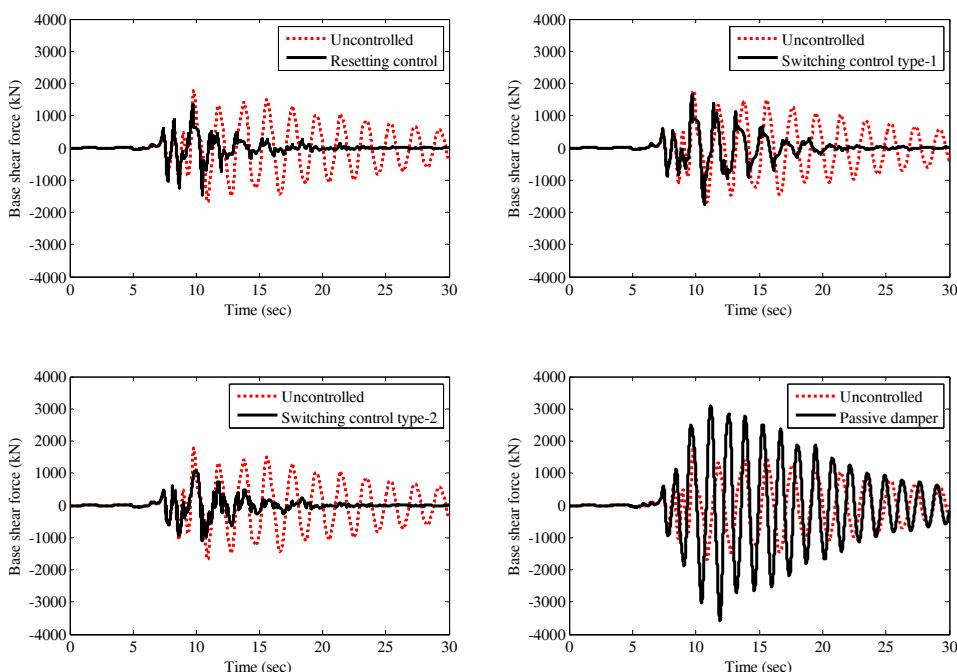
شکل ۶-۱۵- نیروی برشی حداقل طبقات تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA؛ (الف)

. $K_d=K$ (ج) . $K_d=0.5K$ (ب) . $K_d=0.25K$

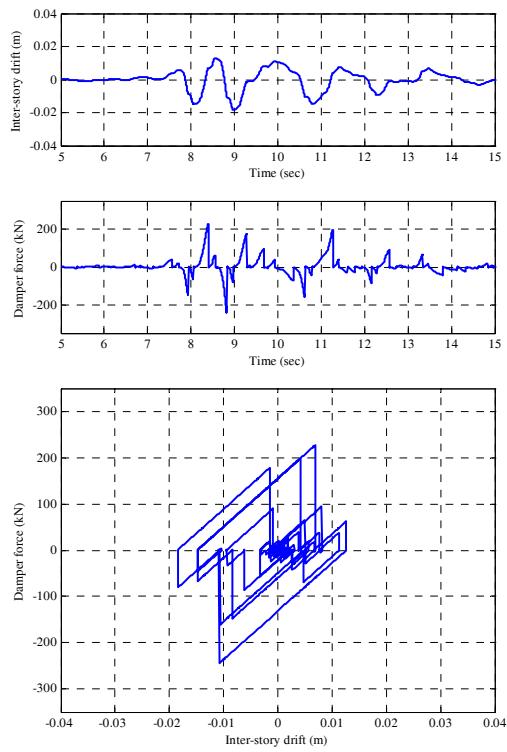
شکل ۶-۱۶- پاسخ زمانی برش پایه را برای $K_d=K$ نشان می‌دهد. همان طوری که در شکل مشاهده می‌شود بیشترین میزان کاهش برش پایه مربوط به روش کنترل قطع و وصل نوع ۲ است. در روش کنترل باز تنظیمی، برش پایه اندکی کاهش یافته است اما در روش کنترل قطع و وصل نوع ۱

تغییر چندانی در مقدار برش پایه مشاهده نمی‌شود. این در حالیست که روش کنترل غیرفعال مقدار برش پایه را به میزان قابل توجهی افزایش داده است.

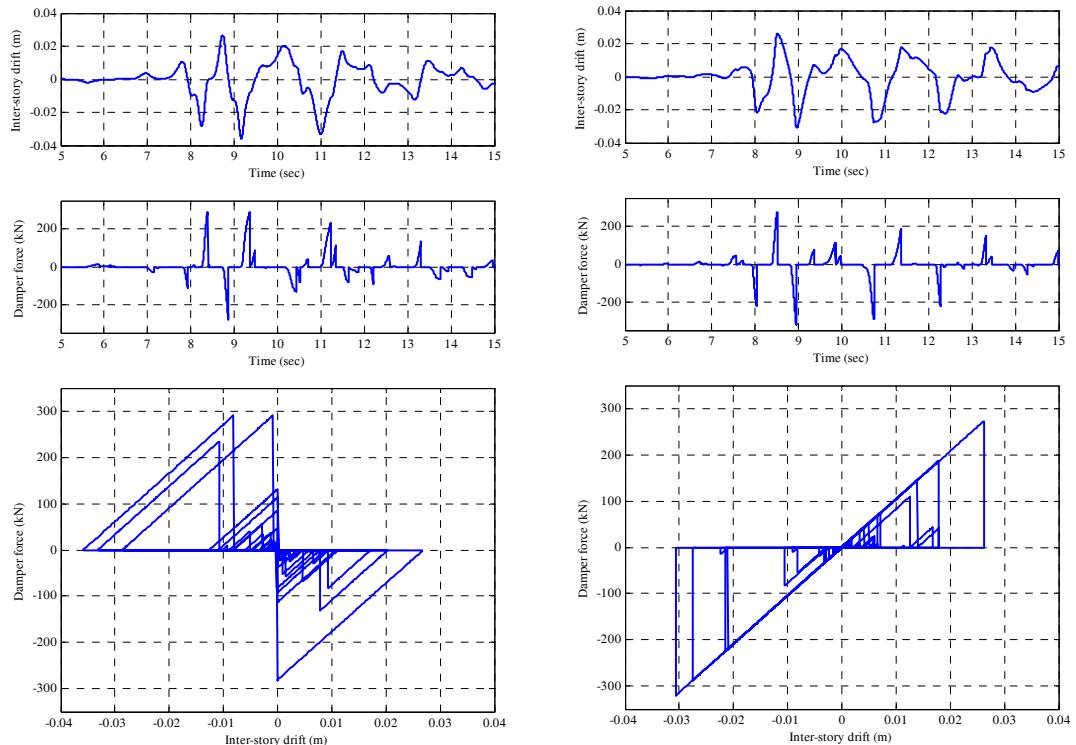
در شکل ۶-۱۷ منحنی نیرو-تغییرمکان میراگر به همراه پاسخ زمانی جابجایی نسبی و پاسخ زمانی نیروی میراگر برای $K_d=K$ در تراز بام قاب ۱۰ طبقه نشان داده شده است. همان طوری که در شکل مشاهده می‌شود، میراگر مطابق رفتار پیش‌بینی شده عمل کرده است. با دقت در پاسخ زمانی جابجایی نسبی و نیروی میراگر (گراف‌های اول و دوم) در شکل ۶-۱۷-الف و ب، مشاهده می‌شود که باز تنظیم شدن‌ها (محل‌هایی که نیروی میراگر به طور ناگهانی به صفر رسیده است) مطابق الگوریتم کنترلی تعریف شده برای روش کنترل باز تنظیمی و قطع و وصل نوع ۱، در نقاط حداکثر جابجایی نسبی رخ داده است. این در حالی است که مطابق شکل ۶-۱۷-ج، در روش کنترل قطع و وصل نوع ۲ نقاط باز تنظیم شدن در محل‌های که جابجایی نسبی برابر صفر است اتفاق افتاده است. هر چند تعدادی باز تنظیم شدن‌های ناخواسته در روش کنترل باز تنظیمی و قطع و وصل نوع ۲ مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از عملکرد نامناسب الگوریتم کنترلی به کار رفته در تشخیص نقاط باز تنظیم شدن میراگر باشد. با دقت در شکل مشاهده می‌شود که در روش کنترل باز تنظیمی دامنه جابجایی نسبت به سایر روش‌های کنترل سریع‌تر افت کرده و به صفر می‌رسد که نشان از عملکرد بهتر این روش در اتلاف انرژی وارد شده به سازه دارد.



شکل ۶-۱۶- پاسخ زمانی برش پایه قاب ۱۰ طبقه تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA وقتی $K_d=K$



(الف)



(ب)

(ج)

شکل ۶-۱۷- پاسخ زمانی جابجایی نسبی، نیروی میراگر و منحنی نیرو-تغییرمکان میراگر در تراز بام قاب ۱۰ طبقه تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA وقتی $K_d = K$; (الف) روش کنترل باز تنظیمی،

(ب) روش کنترل قطع و وصل نوع ۱، (ج) روش کنترل قطع و وصل نوع ۲.

۳-۳-۶- قاب ساختمانی ۱۵ طبقه

در این بخش نتایج تحلیل خطی قاب ۱۵ طبقه تحت زلزله‌های حوزه نزدیک مقیاس شده ارایه شده است. زمان تناوب سه مد اول قاب ۱۵ طبقه به ترتیب برابر $2/5$ ثانیه، $0/96$ ثانیه و $0/61$ ثانیه است. پاسخ‌های حداکثر قاب ۱۵ طبقه در جداول ۲۵-۶ الی ۳۴-۶ ارایه شده است. با دقت در جداول ۲۵-۶ الی ۳۴-۶ نتایج زیر قابل استخراج است:

- تقریباً تمام روش‌های کنترل مورد مطالعه، جابجایی حداکثر و جابجایی نسبی حداکثر را به طور موثری تحت تمام زلزله‌های حوزه نزدیک مطالعه شده کاهش داده‌اند و میزان کاهش با افزایش نسبت K_d/K ، افزایش یافته است. تقریباً در تمام زلزله‌ها، بیشترین میزان کاهش جابجایی نسبی حداکثر قاب ۱۵ طبقه مربوط به روش کنترل باز تنظیمی بوده که بسته به نسبت K_d/K چیزی در حدود 0.50% - 0.30% کاهش داشته است. پس از آن روش کنترل قطع و وصل نوع ۱ بیشترین میزان کاهش در جابجایی نسبی حداکثر را نشان می‌دهد که بسته به نسبت K_d/K چیزی در حدود 0.35% - 0.15% درصد کاهش مشاهده می‌شود. در قاب ۱۵ طبقه برخلاف قاب‌های ۵ و ۱۰ طبقه، روش کنترل غیرفعال نیز در اکثر زلزله‌ها باعث کاهش پاسخ جابجایی حداکثر و جابجایی نسبی حداکثر قاب ۱۵ طبقه شده است که میزان کاهش جابجایی نسبی حداکثر بسته به نسبت K_d/K چیزی در حدود 0.35% - 0.15% است. روش کنترل قطع و وصل نوع ۲ با ۰.۳۰%-۰.۱۵% کاهش پاسخ در رتبه بعدی قرار می‌گیرد.
- تقریباً تمام روش‌های کنترل باعث افزایش شتاب مطلق حداکثر قاب ۱۵ طبقه در اکثر زلزله‌های مورد مطالعه شده‌اند. این افزایش مخصوصاً هنگامی که نسبت $K_d/K=1$ است، بیشتر است.
- به جز روش کنترل غیرفعال، تمام روش‌های کنترل مطالعه شده باعث کاهش قابل توجه شتاب RMS قاب ۱۵ طبقه شده‌اند که این میزان کاهش، با افزایش نسبت K_d/K افزایش یافته است. میزان کاهش شتاب RMS بسته به نسبت K_d/K و زلزله مورد مطالعه در روش کنترل باز

تنظیمی در حدود ۱۵٪-۶۵٪، روش کنترل قطع و وصل نوع ۱ حدود ۵۵٪-۱۰٪ و در روش کنترل قطع و وصل نوع ۲ حدود ۶۰٪-۱۰٪ است.

▪ تقریباً تمام روش‌های کنترل به جز روش کنترل غیرفعال در تمام زلزله‌ها باعث کاهش نیروی برشی حداکثر قاب شده‌اند. و میزان کاهش با افزایش نسبت K_d/K ، افزایش یافته است. در اکثر زلزله‌ها بهترین عملکرد مربوط به روش کنترل قطع و وصل نوع ۲ است که میزان کاهش نیروی برشی حداکثر قاب بسته به نسبت K_d/K و زلزله مورد مطالعه در حدود ۴۵٪-۱۰٪ است. پس از آن بهترین عملکرد مربوط به روش کنترل باز تنظیمی است که بسته به نسبت K_d/K و زلزله مورد مطالعه توانسته نیروی برشی حداکثر قاب را در حدود ۴۰٪-۵٪ کاهش دهد. روش کنترل قطع و وصل نوع ۱ نیز در برخی موارد باعث کاهش ۲۰٪-۵٪ نیروی برشی حداکثر قاب شده است.

جدول ۶-۲۵- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۱۵ طبقه تحت زلزله مندوسينو (۱۹۹۲) ایستگاه پترولیا.

Control Method	x_{max} (m)	$\frac{x_{max}^{con}}{x_{max}^{unc}}$	$Drift_{max}$ (m)	$\frac{Drift_{max}^{con}}{Drift_{max}^{unc}}$	a_{max} (m/s ²)	$\frac{a_{max}^{con}}{a_{max}^{unc}}$	a_{RMS} (m/s ²)	$\frac{a_{RMS}^{con}}{a_{RMS}^{unc}}$	Vb_{max} (kN)	$\frac{Vb_{max}^{con}}{Vb_{max}^{unc}}$	Fd_{max} (kN)	$\frac{Fd_{max}}{W_e}$
$K_d=0.25K$												
Resetting control	0.566	0.65	0.049	0.65	1.05	1.15	1.29	0.45	2574.3	0.74	857.2	11.8
Switching control type-1	0.659	0.75	0.056	0.73	0.94	1.03	1.85	0.65	3205.1	0.92	641.0	8.8
Switching control type-2	0.698	0.80	0.061	0.81	1.00	1.09	1.74	0.61	2794.4	0.81	639.0	8.8
Passive control	0.733	0.84	0.063	0.83	1.04	1.14	2.76	0.96	3940.0	1.14	788.0	10.8
Uncontrolled	0.876	---	0.076	---	0.91	---	2.86	---	3466.4	---	0.0	---
$K_d=0.5K$												
Resetting control	0.468	0.53	0.044	0.58	1.67	1.83	1.11	0.39	2550.6	0.74	1321.9	18.2
Switching control type-1	0.591	0.67	0.048	0.64	1.32	1.44	1.56	0.55	3218.4	0.93	1071.3	14.7
Switching control type-2	0.650	0.74	0.059	0.78	1.48	1.62	1.42	0.50	2477.3	0.71	1103.8	15.2
Passive control	0.621	0.71	0.059	0.78	1.23	1.34	2.42	0.85	4080.7	1.18	1360.2	18.7
Uncontrolled	0.876	---	0.076	---	0.91	---	2.86	---	3466.4	---	0.0	---
$K_d=K$												
Resetting control	0.389	0.44	0.037	0.49	2.24	2.45	0.97	0.34	2970.9	0.86	1766.7	24.3
Switching control type-1	0.499	0.57	0.043	0.57	2.39	2.62	1.35	0.47	3525.7	1.02	1763.1	24.2
Switching control type-2	0.560	0.64	0.057	0.75	2.41	2.64	1.18	0.41	2092.0	0.60	1882.3	25.9
Passive control	0.450	0.51	0.045	0.60	1.20	1.32	2.20	0.77	4911.0	1.42	2455.5	33.7
Uncontrolled	0.876	---	0.076	---	0.91	---	2.86	---	3466.4	---	0.0	---

جدول ۶-۲۶- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۱۵ طبقه تحت زلزله ارزینکان (۱۹۹۲) ایستگاه ارزینکان.

Control Method	x_{max} (m)	$\frac{x_{max}^{con}}{x_{max}^{unc}}$	$Drift_{max}$ (m)	$\frac{Drift_{max}^{con}}{Drift_{max}^{unc}}$	a_{max} (m/s ²)	$\frac{a_{max}^{con}}{a_{max}^{unc}}$	a_{RMS} (m/s ²)	$\frac{a_{RMS}^{con}}{a_{RMS}^{unc}}$	Vb_{max} (kN)	$\frac{Vb_{max}^{con}}{Vb_{max}^{unc}}$	Fd_{max} (kN)	$\frac{Fd_{max}}{W_e}$
$K_d=0.25K$												
Resetting control	0.693	0.67	0.060	0.66	1.69	1.93	1.68	0.59	3427.6	0.95	1234.6	17.0
Switching control type-1	0.854	0.83	0.075	0.82	1.31	1.50	2.34	0.83	3782.0	1.05	755.7	10.4
Switching control type-2	0.852	0.83	0.078	0.84	0.99	1.13	2.08	0.73	3273.9	0.91	818.7	11.2
Passive control	0.944	0.92	0.082	0.89	0.96	1.10	3.85	1.36	4274.9	1.19	855.0	11.7
Uncontrolled	1.028	---	0.092	---	0.88	---	2.84	---	3599.7	---	0.0	---
$K_d=0.5K$												
Resetting control	0.617	0.60	0.054	0.58	2.46	2.81	1.41	0.50	3158.5	0.88	1848.2	25.4
Switching control type-1	0.755	0.73	0.067	0.73	1.93	2.21	2.12	0.75	4224.7	1.17	1407.7	19.3
Switching control type-2	0.735	0.71	0.063	0.68	2.05	2.34	1.78	0.63	3103.8	0.86	1549.8	21.3
Passive control	0.850	0.83	0.073	0.79	1.05	1.21	4.07	1.43	4684.5	1.30	1561.5	21.4
Uncontrolled	1.028	---	0.092	---	0.88	---	2.84	---	3599.7	---	0.0	---
$K_d=K$												
Resetting control	0.486	0.47	0.043	0.47	2.64	3.02	1.27	0.45	2762.5	0.77	2088.8	28.7
Switching control type-1	0.702	0.68	0.061	0.66	2.90	3.31	1.85	0.65	4395.1	1.22	2194.5	30.1
Switching control type-2	0.571	0.56	0.051	0.56	2.74	3.13	1.49	0.53	2650.3	0.74	2113.4	29.0
Passive control	0.694	0.68	0.059	0.64	1.24	1.41	3.83	1.35	5124.7	1.42	2562.4	35.2
Uncontrolled	1.028	---	0.092	---	0.88	---	2.84	---	3599.7	---	0.0	---

جدول ۶-۲۷- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۱۵ طبقه تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA

Control Method	x_{max} (m)	$\frac{x_{con}}{x_{unc}}$	$Drift_{max}$ (m)	$\frac{Drift_{con}}{Drift_{unc}}$	a_{max} (m/s ²)	$\frac{a_{max}}{a_{unc}}$	a_{RMS} (m/s ²)	$\frac{a_{RMS}}{a_{unc}}$	Vb_{max} (kN)	$\frac{Vb_{con}}{Vb_{unc}}$	Fd_{max} (kN)	$\frac{Fd_{max}}{W_e}$
$K_d=0.25K$												
Resetting control	0.338	0.74	0.031	0.52	0.68	0.76	1.07	0.65	1705.4	0.69	458.6	6.3
Switching control type-1	0.393	0.86	0.048	0.79	0.93	1.03	1.35	0.83	2175.3	0.87	434.7	6.0
Switching control type-2	0.356	0.78	0.055	0.92	0.94	1.04	1.18	0.72	2095.8	0.84	490.2	6.7
Passive control	0.442	0.96	0.052	0.86	0.99	1.09	2.01	1.23	2562.9	1.03	512.6	7.0
Uncontrolled	0.458	---	0.061	---	0.90	---	1.63	---	2487.1	---	0.0	---
$K_d=0.5K$												
Resetting control	0.300	0.66	0.027	0.44	0.95	1.05	0.98	0.60	1818.0	0.73	765.1	10.5
Switching control type-1	0.356	0.78	0.041	0.68	0.96	1.06	1.27	0.77	1962.9	0.79	654.4	9.0
Switching control type-2	0.366	0.80	0.051	0.85	0.91	1.01	1.03	0.63	1521.6	0.61	590.1	8.1
Passive control	0.366	0.80	0.043	0.71	0.88	0.98	2.19	1.34	2610.0	1.05	870.0	12.0
Uncontrolled	0.458	---	0.061	---	0.90	---	1.63	---	2487.1	---	0.0	---
$K_d=K$												
Resetting control	0.251	0.55	0.021	0.35	1.47	1.63	0.93	0.57	1955.2	0.79	1163.9	16.0
Switching control type-1	0.314	0.69	0.034	0.57	1.27	1.40	1.19	0.73	2062.2	0.83	1030.4	14.2
Switching control type-2	0.379	0.83	0.042	0.69	1.55	1.72	0.98	0.60	1477.8	0.59	1171.1	16.1
Passive control	0.413	0.90	0.036	0.60	1.13	1.25	2.58	1.58	3417.2	1.37	1708.6	23.5
Uncontrolled	0.458	---	0.061	---	0.90	---	1.63	---	2487.1	---	0.0	---

جدول ۶-۲۸- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۱۵ طبقه تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه تاکاتوری.

Control Method	x_{max} (m)	$\frac{x_{con}}{x_{unc}}$	$Drift_{max}$ (m)	$\frac{Drift_{con}}{Drift_{unc}}$	a_{max} (m/s ²)	$\frac{a_{max}}{a_{unc}}$	a_{RMS} (m/s ²)	$\frac{a_{RMS}}{a_{unc}}$	Vb_{max} (kN)	$\frac{Vb_{con}}{Vb_{unc}}$	Fd_{max} (kN)	$\frac{Fd_{max}}{W_e}$
$K_d=0.25K$												
Resetting control	0.597	0.66	0.051	0.67	1.40	1.30	1.91	0.63	2779.7	0.83	1020.5	14.0
Switching control type-1	0.872	0.97	0.073	0.95	1.19	1.11	2.56	0.85	3654.0	1.09	730.9	10.0
Switching control type-2	0.705	0.78	0.061	0.80	0.90	0.84	2.14	0.71	2844.5	0.85	711.9	9.8
Passive control	1.154	1.28	0.100	1.31	1.27	1.17	4.42	1.46	5632.5	1.68	1126.5	15.5
Uncontrolled	0.903	---	0.077	---	1.08	---	3.02	---	3346.1	---	0.0	---
$K_d=0.5K$												
Resetting control	0.490	0.54	0.045	0.58	1.86	1.73	1.62	0.54	2627.1	0.79	1439.9	19.8
Switching control type-1	0.807	0.89	0.068	0.88	1.80	1.67	2.42	0.80	3757.5	1.12	1253.1	17.2
Switching control type-2	0.591	0.65	0.058	0.75	1.54	1.43	1.87	0.62	2392.1	0.71	1196.8	16.4
Passive control	1.195	1.32	0.102	1.33	1.32	1.22	5.00	1.66	6849.9	2.05	2283.3	31.4
Uncontrolled	0.903	---	0.077	---	1.08	---	3.02	---	3346.1	---	0.0	---
$K_d=K$												
Resetting control	0.407	0.45	0.036	0.48	2.56	2.37	1.40	0.46	2990.2	0.89	1907.0	26.2
Switching control type-1	0.668	0.74	0.056	0.73	2.84	2.64	2.25	0.75	4167.2	1.25	2083.9	28.6
Switching control type-2	0.495	0.55	0.053	0.69	2.99	2.78	1.64	0.54	2301.4	0.69	2289.7	31.5
Passive control	0.773	0.86	0.067	0.87	1.04	0.96	3.43	1.14	5938.9	1.77	2969.5	40.8
Uncontrolled	0.903	---	0.077	---	1.08	---	3.02	---	3346.1	---	0.0	---

جدول ۶-۲۹- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۱۵ طبقه تحت زلزله لندرز (۱۹۹۲) ایستگاه لاسرن.

Control Method	x_{max} (m)	$\frac{x_{con}}{x_{unc}}$	$Drift_{max}$ (m)	$\frac{Drift_{con}}{Drift_{unc}}$	a_{max} (m/s ²)	$\frac{a_{con}}{a_{unc}}$	a_{RMS} (m/s ²)	$\frac{a_{con}}{a_{RMS}}$	Vb_{max} (kN)	$\frac{Vb_{con}}{Vb_{unc}}$	Fd_{max} (kN)	$\frac{Fd}{W_e}$
$K_d=0.25K$												
Resetting control	0.317	0.94	0.027	0.95	0.51	1.18	0.59	0.85	1333.6	0.98	166.4	2.3
Switching control type-1	0.308	0.91	0.026	0.95	0.42	0.98	0.62	0.90	1340.5	0.99	167.2	2.3
Switching control type-2	0.350	1.04	0.029	1.03	0.46	1.06	0.61	0.89	1353.5	0.99	273.6	3.8
Passive control	0.272	0.81	0.023	0.81	0.48	1.10	0.74	1.06	1347.0	0.99	269.4	3.7
Uncontrolled	0.338	---	0.028	---	0.43	---	0.69	---	1360.7	---	0.0	---
$K_d=0.5K$												
Resetting control	0.317	0.94	0.026	0.95	0.59	1.37	0.59	0.85	1336.9	0.98	284.7	3.9
Switching control type-1	0.305	0.90	0.026	0.93	0.42	0.98	0.60	0.87	1322.7	0.97	311.9	4.3
Switching control type-2	0.358	1.06	0.029	1.04	0.67	1.54	0.61	0.88	1349.5	0.99	298.8	4.1
Passive control	0.226	0.67	0.020	0.70	0.45	1.04	0.69	1.00	1328.2	0.98	442.7	6.1
Uncontrolled	0.338	---	0.028	---	0.43	---	0.69	---	1360.7	---	0.0	---
$K_d=K$												
Resetting control	0.291	0.86	0.024	0.87	0.80	1.85	0.61	0.88	1412.5	1.04	594.3	8.2
Switching control type-1	0.287	0.85	0.024	0.87	0.72	1.65	0.60	0.86	1423.1	1.05	487.1	6.7
Switching control type-2	0.365	1.08	0.030	1.06	0.68	1.57	0.61	0.89	1378.8	1.01	429.3	5.9
Passive control	0.174	0.52	0.015	0.55	0.47	1.08	0.89	1.29	1678.8	1.23	839.4	11.5
Uncontrolled	0.338	---	0.028	---	0.43	---	0.69	---	1360.7	---	0.0	---

جدول ۶-۳۰- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۱۵ طبقه تحت زلزله لوماپریتا (۱۹۸۹) ایستگاه سد

لگزینگتون

Control Method	x_{max} (m)	$\frac{x_{con}}{x_{unc}}$	$Drift_{max}$ (m)	$\frac{Drift_{con}}{Drift_{unc}}$	a_{max} (m/s ²)	$\frac{a_{con}}{a_{unc}}$	a_{RMS} (m/s ²)	$\frac{a_{con}}{a_{RMS}}$	Vb_{max} (kN)	$\frac{Vb_{con}}{Vb_{unc}}$	Fd_{max} (kN)	$\frac{Fd}{W_e}$
$K_d=0.25K$												
Resetting control	0.530	0.71	0.056	0.64	1.17	1.03	1.85	0.58	2775.8	0.81	730.0	10.0
Switching control type-1	0.660	0.88	0.068	0.78	1.35	1.19	2.38	0.75	2877.3	0.84	554.6	7.6
Switching control type-2	0.587	0.78	0.068	0.79	0.98	0.86	2.25	0.71	2950.7	0.86	737.7	10.1
Passive control	0.745	0.99	0.074	0.85	1.30	1.14	2.87	0.91	3249.5	0.95	649.9	8.9
Uncontrolled	0.751	---	0.087	---	1.14	---	3.16	---	3433.2	---	0.0	---
$K_d=0.5K$												
Resetting control	0.469	0.63	0.045	0.51	1.68	1.47	1.62	0.51	2540.3	0.74	1309.2	18.0
Switching control type-1	0.641	0.85	0.064	0.74	1.47	1.29	2.16	0.68	3057.7	0.89	1019.2	14.0
Switching control type-2	0.579	0.77	0.058	0.67	1.63	1.43	1.88	0.60	2539.9	0.74	1270.0	17.4
Passive control	0.770	1.03	0.070	0.80	1.42	1.25	2.87	0.91	3430.0	1.00	1143.3	15.7
Uncontrolled	0.751	---	0.087	---	1.14	---	3.16	---	3433.2	---	0.0	---
$K_d=K$												
Resetting control	0.410	0.55	0.039	0.46	2.73	2.40	1.48	0.47	3094.8	0.90	2114.7	29.0
Switching control type-1	0.614	0.82	0.064	0.74	1.88	1.65	2.00	0.63	3013.7	0.88	1506.8	20.7
Switching control type-2	0.572	0.76	0.057	0.65	2.76	2.42	1.69	0.53	2332.7	0.68	2123.5	29.2
Passive control	0.726	0.97	0.063	0.73	1.42	1.25	3.65	1.16	4666.1	1.36	2333.1	32.0
Uncontrolled	0.751	---	0.087	---	1.14	---	3.16	---	3433.2	---	0.0	---

جدول ۶-۳۱- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۱۵ طبقه تحت زلزله لوماپریتا (۱۹۸۹) ایستگاه لس‌گاتوس.

Control Method	x_{max} (m)	$\frac{x_{max}^{con}}{x_{max}^{unc}}$	$Drift_{max}$ (m)	$\frac{Drift_{max}^{con}}{Drift_{max}^{unc}}$	a_{max} (m/s ²)	$\frac{a_{max}^{con}}{a_{max}^{unc}}$	a_{RMS} (m/s ²)	$\frac{a_{RMS}^{con}}{a_{RMS}^{unc}}$	Vb_{max} (kN)	$\frac{Vb_{max}^{con}}{Vb_{max}^{unc}}$	Fd_{max} (kN)	$\frac{Fd_{max}}{W_e}$
$K_d=0.25K$												
Resetting control	0.729	0.73	0.062	0.67	1.38	1.26	1.79	0.54	3118.8	0.74	1053.8	14.5
Switching control type-1	0.888	0.88	0.074	0.80	1.32	1.21	2.26	0.68	3261.2	0.78	651.1	8.9
Switching control type-2	0.928	0.92	0.079	0.86	1.19	1.09	2.28	0.69	3430.8	0.82	859.0	11.8
Passive control	0.945	0.94	0.080	0.86	1.24	1.13	2.22	0.67	3851.8	0.92	770.4	10.6
Uncontrolled	1.004	---	0.093	---	1.09	---	3.30	---	4188.6	---	0.0	---
$K_d=0.5K$												
Resetting control	0.575	0.57	0.050	0.54	2.21	2.03	1.60	0.49	3148.9	0.75	1729.8	23.8
Switching control type-1	0.800	0.80	0.067	0.73	1.55	1.42	1.97	0.60	3426.5	0.82	1141.9	15.7
Switching control type-2	0.852	0.85	0.075	0.81	2.05	1.88	1.95	0.59	3217.8	0.77	1610.2	22.1
Passive control	0.843	0.84	0.071	0.77	1.36	1.25	3.13	0.95	4695.5	1.12	1565.2	21.5
Uncontrolled	1.004	---	0.093	---	1.09	---	3.30	---	4188.6	---	0.0	---
$K_d=K$												
Resetting control	0.427	0.43	0.037	0.39	3.14	2.88	1.37	0.42	3366.6	0.80	2466.8	33.9
Switching control type-1	0.669	0.67	0.057	0.62	2.34	2.15	1.83	0.56	3640.0	0.87	1819.4	25.0
Switching control type-2	0.689	0.69	0.064	0.69	3.28	3.01	1.83	0.55	2824.5	0.67	2528.2	34.7
Passive control	0.877	0.87	0.076	0.82	1.78	1.64	5.07	1.54	7589.0	1.81	3794.5	52.1
Uncontrolled	1.004	---	0.093	---	1.09	---	3.30	---	4188.6	---	0.0	---

جدول ۶-۳۲- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۱۵ طبقه تحت زلزله نورث‌ریدج (۱۹۹۴) ایستگاه رینالدی.

Control Method	x_{max} (m)	$\frac{x_{max}^{con}}{x_{max}^{unc}}$	$Drift_{max}$ (m)	$\frac{Drift_{max}^{con}}{Drift_{max}^{unc}}$	a_{max} (m/s ²)	$\frac{a_{max}^{con}}{a_{max}^{unc}}$	a_{RMS} (m/s ²)	$\frac{a_{RMS}^{con}}{a_{RMS}^{unc}}$	Vb_{max} (kN)	$\frac{Vb_{max}^{con}}{Vb_{max}^{unc}}$	Fd_{max} (kN)	$\frac{Fd_{max}}{W_e}$
$K_d=0.25K$												
Resetting control	0.346	0.80	0.040	0.66	0.79	0.82	1.42	0.71	1717.0	1.07	486.5	6.7
Switching control type-1	0.411	0.95	0.051	0.84	1.15	1.20	1.80	0.90	1715.0	1.07	343.0	4.7
Switching control type-2	0.369	0.85	0.051	0.84	0.86	0.90	1.50	0.75	1543.4	0.96	385.9	5.3
Passive control	0.445	1.03	0.053	0.88	1.04	1.08	2.64	1.32	2191.3	1.36	438.3	6.0
Uncontrolled	0.434	---	0.061	---	0.96	---	2.01	---	1607.0	---	0.0	---
$K_d=0.5K$												
Resetting control	0.310	0.71	0.033	0.55	1.07	1.11	1.31	0.65	1870.8	1.16	851.5	11.7
Switching control type-1	0.395	0.91	0.044	0.72	1.22	1.27	1.71	0.85	1866.4	1.16	622.1	8.5
Switching control type-2	0.342	0.79	0.045	0.74	0.94	0.98	1.32	0.66	1533.9	0.95	767.0	10.5
Passive control	0.442	1.02	0.048	0.78	1.00	1.04	2.92	1.45	2566.4	1.60	855.5	11.8
Uncontrolled	0.434	---	0.061	---	0.96	---	2.01	---	1607.0	---	0.0	---
$K_d=K$												
Resetting control	0.280	0.65	0.026	0.43	1.78	1.85	1.21	0.60	2125.6	1.32	1387.4	19.1
Switching control type-1	0.379	0.87	0.037	0.61	1.26	1.31	1.60	0.80	2129.5	1.33	1064.8	14.6
Switching control type-2	0.285	0.66	0.033	0.55	1.92	1.99	1.21	0.60	1539.8	0.96	1507.4	20.7
Passive control	0.422	0.97	0.041	0.68	1.07	1.12	2.34	1.17	2999.7	1.87	1499.8	20.6
Uncontrolled	0.434	---	0.061	---	0.96	---	2.01	---	1607.0	---	0.0	---

جدول ۶-۳۳- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۱۵ طبقه تحت زلزله نورثridج (۱۹۹۴) ایستگاه اولیویو.

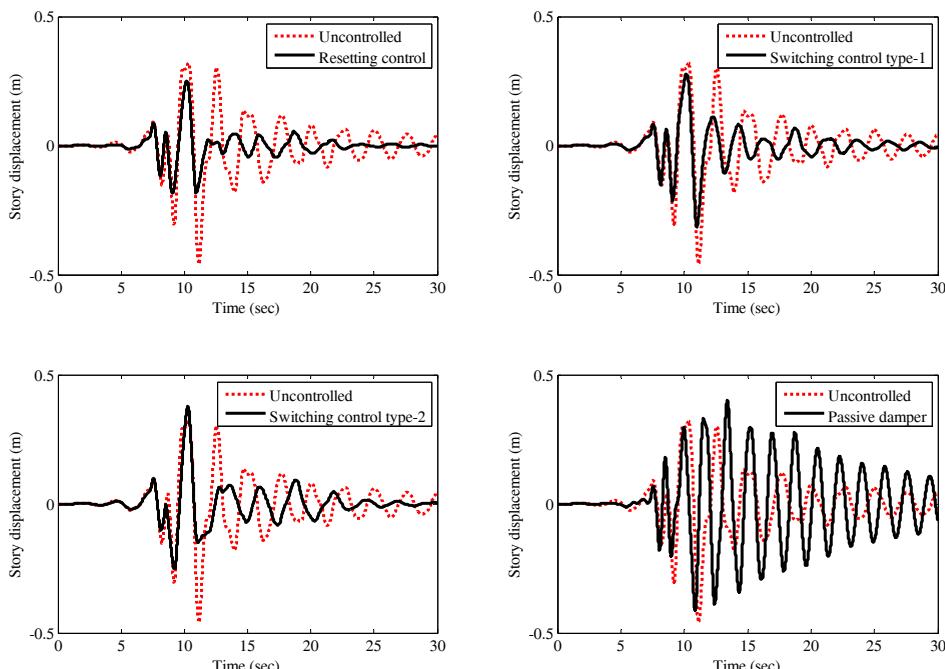
Control Method	x_{max} (m)	$\frac{x_{max}^{con}}{x_{max}^{unc}}$	$Drift_{max}$ (m)	$\frac{Drift_{max}^{con}}{Drift_{max}^{unc}}$	a_{max} (m/s ²)	$\frac{a_{max}^{con}}{a_{max}^{unc}}$	a_{RMS} (m/s ²)	$\frac{a_{RMS}^{con}}{a_{RMS}^{unc}}$	Vb_{max} (kN)	$\frac{Vb_{max}^{con}}{Vb_{max}^{unc}}$	Fd_{max} (kN)	$\frac{Fd_{max}}{W_e}$
$K_d=0.25K$												
Resetting control	0.445	0.55	0.036	0.51	0.88	1.22	1.31	0.47	1927.4	0.63	677.4	9.3
Switching control type-1	0.616	0.76	0.055	0.78	0.76	1.05	1.99	0.72	2759.4	0.90	552.0	7.6
Switching control type-2	0.641	0.79	0.055	0.77	0.74	1.03	1.82	0.66	2286.2	0.74	544.6	7.5
Passive control	0.700	0.86	0.060	0.84	0.70	0.97	2.91	1.05	3514.2	1.14	702.8	9.7
Uncontrolled	0.813	---	0.071	---	0.72	---	2.78	---	3076.1	---	0.0	---
$K_d=0.5K$												
Resetting control	0.400	0.49	0.033	0.47	1.35	1.87	1.12	0.40	1835.6	0.60	1034.0	14.2
Switching control type-1	0.510	0.63	0.044	0.63	1.15	1.61	1.69	0.61	2768.9	0.90	923.1	12.7
Switching control type-2	0.567	0.70	0.048	0.68	1.17	1.63	1.57	0.57	1963.4	0.64	939.0	12.9
Passive control	0.506	0.62	0.045	0.63	0.69	0.95	2.44	0.88	2969.6	0.97	989.9	13.6
Uncontrolled	0.813	---	0.071	---	0.72	---	2.78	---	3076.1	---	0.0	---
$K_d=K$												
Resetting control	0.323	0.40	0.027	0.38	1.80	2.50	0.95	0.34	1818.5	0.59	1328.5	18.2
Switching control type-1	0.429	0.53	0.036	0.51	1.66	2.30	1.40	0.51	2581.5	0.84	1290.2	17.7
Switching control type-2	0.453	0.56	0.038	0.54	2.11	2.93	1.28	0.46	1660.7	0.54	1657.6	22.8
Passive control	0.422	0.52	0.037	0.53	0.79	1.10	1.65	0.59	3394.3	1.10	1697.1	23.3
Uncontrolled	0.813	---	0.071	---	0.72	---	2.78	---	3076.1	---	0.0	---

جدول ۶-۳۴- پاسخ‌های حداکثر قاب ساختمانی ۱۵ طبقه تحت زلزله طبس (۱۹۷۸) ایستگاه طبس.

Control Method	x_{max} (m)	$\frac{x_{max}^{con}}{x_{max}^{unc}}$	$Drift_{max}$ (m)	$\frac{Drift_{max}^{con}}{Drift_{max}^{unc}}$	a_{max} (m/s ²)	$\frac{a_{max}^{con}}{a_{max}^{unc}}$	a_{RMS} (m/s ²)	$\frac{a_{RMS}^{con}}{a_{RMS}^{unc}}$	Vb_{max} (kN)	$\frac{Vb_{max}^{con}}{Vb_{max}^{unc}}$	Fd_{max} (kN)	$\frac{Fd_{max}}{W_e}$
$K_d=0.25K$												
Resetting control	0.310	0.78	0.028	0.73	0.56	0.96	0.77	0.69	1493.4	0.87	461.5	6.3
Switching control type-1	0.352	0.88	0.032	0.84	0.65	1.12	0.92	0.83	1450.8	0.85	288.3	4.0
Switching control type-2	0.387	0.97	0.036	0.94	0.55	0.95	0.82	0.73	1559.2	0.91	289.1	4.0
Passive control	0.370	0.93	0.035	0.93	0.69	1.18	1.34	1.19	2151.3	1.26	430.3	5.9
Uncontrolled	0.397	---	0.038	---	0.58	---	1.12	---	1710.9	---	0.0	---
$K_d=0.5K$												
Resetting control	0.287	0.72	0.027	0.71	0.91	1.56	0.71	0.63	1569.9	0.92	799.9	11.0
Switching control type-1	0.326	0.82	0.029	0.78	0.64	1.11	0.87	0.78	1640.5	0.96	546.9	7.5
Switching control type-2	0.368	0.93	0.034	0.89	0.62	1.06	0.75	0.67	1529.5	0.89	489.9	6.7
Passive control	0.426	1.07	0.036	0.95	0.78	1.34	1.72	1.54	2678.8	1.57	892.9	12.3
Uncontrolled	0.397	---	0.038	---	0.58	---	1.12	---	1710.9	---	0.0	---
$K_d=K$												
Resetting control	0.253	0.64	0.024	0.64	1.56	2.67	0.66	0.59	1828.2	1.07	1271.9	17.5
Switching control type-1	0.304	0.77	0.027	0.72	1.15	1.97	0.85	0.76	2013.0	1.18	1006.6	13.8
Switching control type-2	0.346	0.87	0.032	0.85	0.92	1.58	0.71	0.63	1457.1	0.85	769.3	10.6
Passive control	0.260	0.66	0.024	0.62	0.67	1.15	1.41	1.26	2222.4	1.30	1111.2	15.3
Uncontrolled	0.397	---	0.038	---	0.58	---	1.12	---	1710.9	---	0.0	---

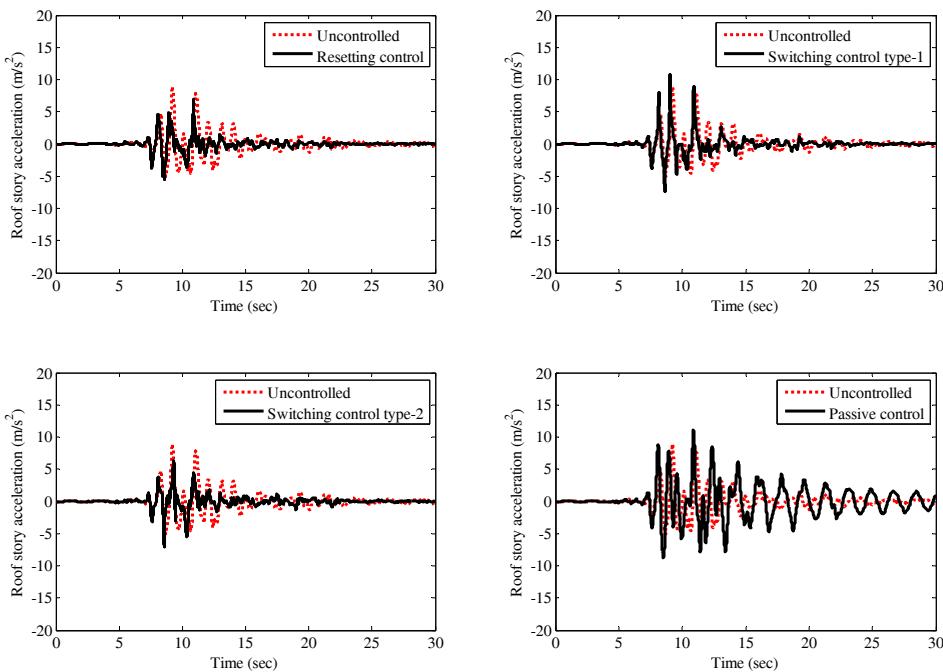
در ادامه گرافهای پاسخ قاب ۱۵ طبقه برای روش‌های مختلف تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA به عنوان نمونه ارایه شده است.

شکل ۶-۱۸ پاسخ زمانی جابجایی بام برای روش‌های مختلف کنترل در مقایسه با حالت کنترل نشده (برای $K_d=K$) را نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود دامنه جابجایی بام برای تمام روش‌های کنترل به جز روش کنترل غیرفعال نسبت به حالت کنترل نشده کاهش یافته است و دامنه جابجایی بام در کمتر از ۵ سیکل تقریباً به صفر رسیده است. روش کنترل باز تنظیمی بیشترین میزان کاهش را نشان می‌دهد. پس از آن به ترتیب روش کنترل قطع و وصل نوع ۱ و روش کنترل قطع و وصل نوع ۲ بیشترین کاهش را داشته‌اند.



شکل ۶-۱۸- پاسخ زمانی جابجایی بام قاب ۱۵ طبقه تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA وقتی $K_d=K$

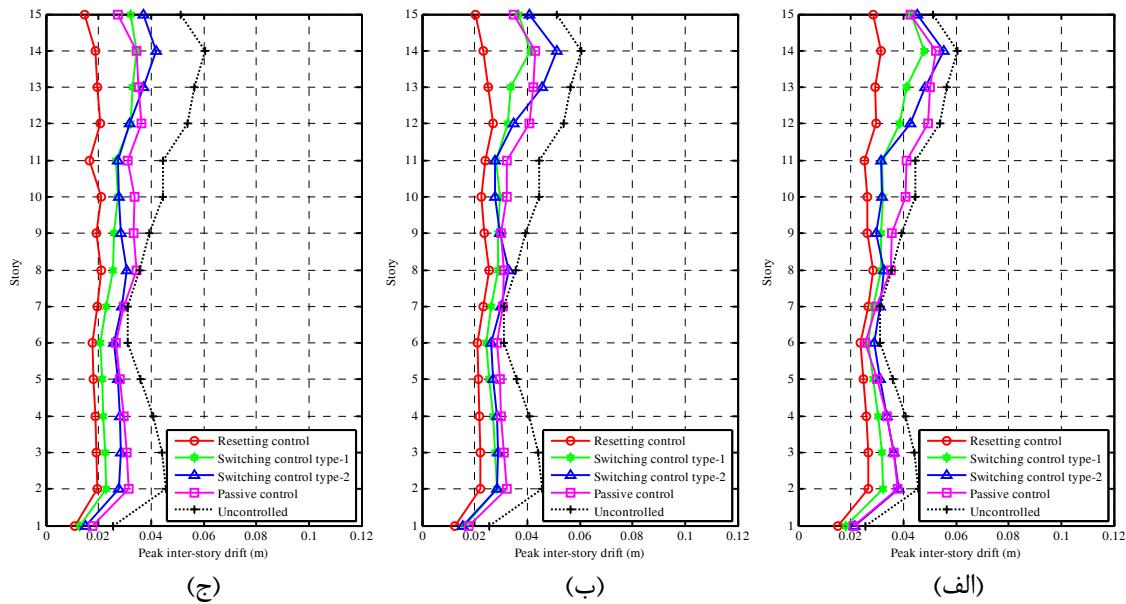
شکل ۶-۱۹ پاسخ زمانی شتاب بام را برای $K_d=K$ نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود روش کنترل غیرفعال شتاب بام را افزایش داده است در حالی که روش کنترل قطع و وصل نوع ۱ تأثیر چندانی بر شتاب بام نداشته است. روش کنترل باز تنظیمی و روش کنترل قطع و وصل نوع ۲ اندکی شتاب بام را کاهش داده‌اند.



شکل ۶-۱۹ - پاسخ زمانی شتاب مطلق بام قاب ۱۵ طبقه تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA وقتی $K_d = K$

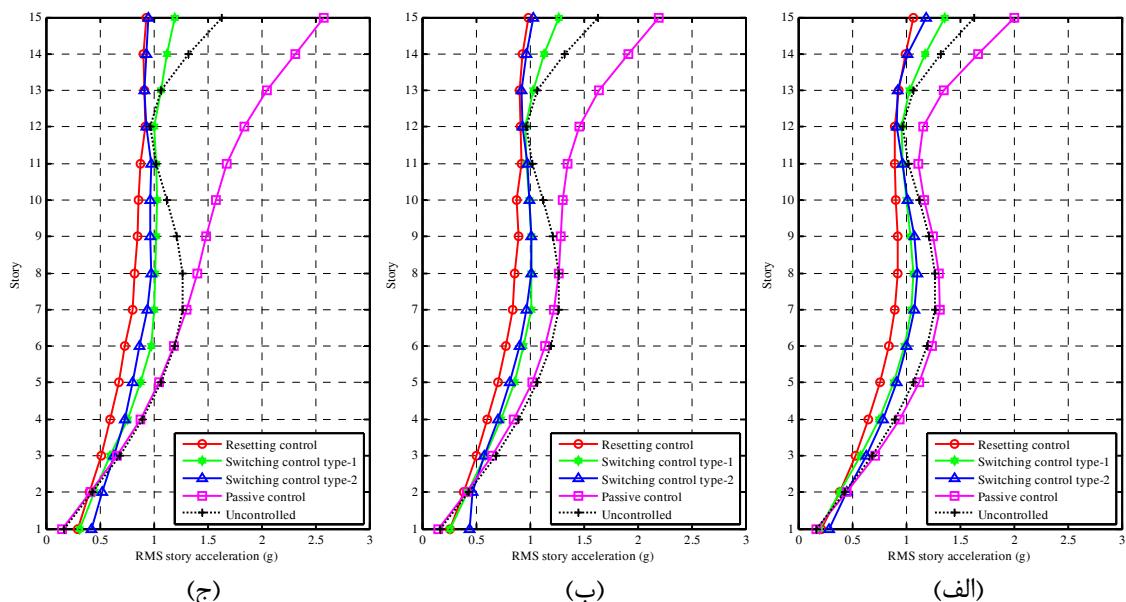
در شکل ۶-۲۰ جابجایی نسبی طبقات برای روش‌های مختلف کنترل و نسبت‌های متفاوت K_d/K ارایه شده است. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود تمام روش‌های کنترل باعث کاهش جابجایی نسبی طبقات شده‌اند که این میزان کاهش با افزایش نسبت K_d/K ، افزایش یافته است. علاوه بر این برای نسبت‌های K_d/K بزرگ‌تر، تقریباً تمام روش‌های کنترل باعث توزیع یکنواخت‌تر جابجایی نسبی در ارتفاع قاب شده است. این رفتار قاب ۱۵ طبقه تقریباً در مورد تمام زلزله‌های مطالعه شده صادق است.

شکل ۶-۲۱ شتاب RMS طبقات را برای روش‌های مختلف کنترل نشان می‌دهد. همان طور که در شکل نشان داده شده، هر سه روش کنترل باز تنظیمی، قطع و وصل نوع ۱ و روش کنترل قطع و وصل نوع ۲ تقریباً به یک میزان مقدار شتاب RMS طبقات قاب ۱۵ طبقه را کاهش داده‌اند و این میزان برای تمام نسبت‌های K_d/K تقریباً یکسان است. این در حالیست که روش کنترل غیرفعال باعث افزایش شتاب RMS طبقات در طبقات بالا شده است و با افزایش نسبت K_d/K شتاب RMS طبقات نیز افزایش یافته است.



شکل ۶-۲۰- جابجایی نسبی تحت زلزله کوبه (JMA) ایستگاه (الف)؛ (ب) $K_d=0.25K$

$.K_d=K$ (ج) $K_d=0.5K$



شکل ۶-۲۱- شتاب RMS طبقات تحت زلزله کوبه (JMA) ایستگاه (الف)؛ (ب) $K_d=0.25K$

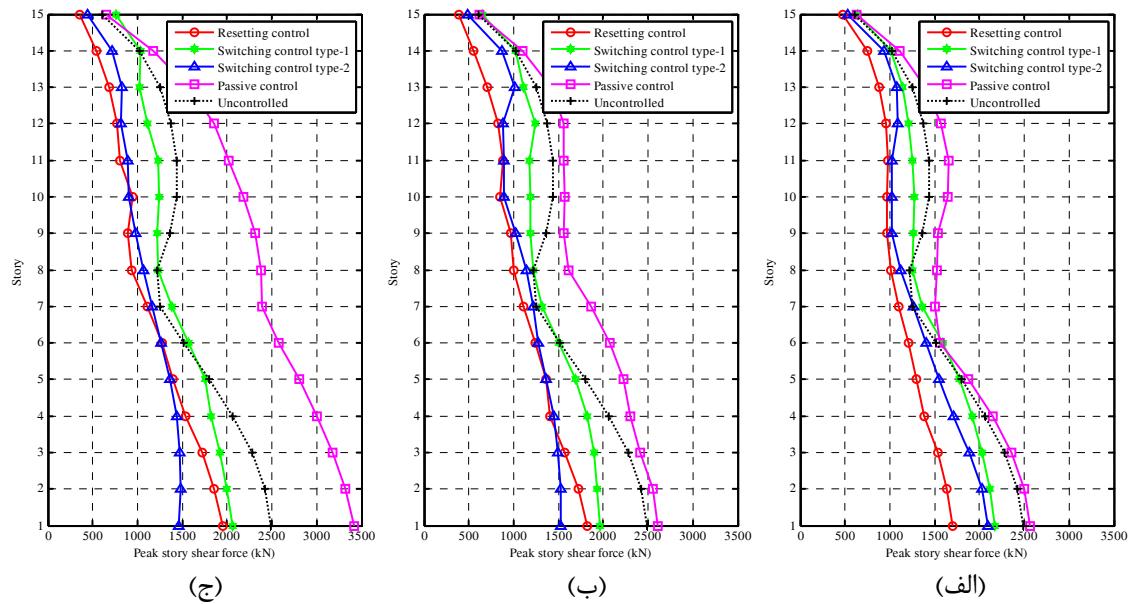
$.K_d=K$ (ج) $K_d=0.5K$

در شکل ۶-۲۲ نیروی برشی حداکثر طبقات برای روش‌های مختلف کنترل ارایه شده است. با دقت در این شکل مشاهده می‌شود که در تمام روش‌های کنترل به جز روش کنترل غیرفعال، نیروی برشی طبقات بالایی و پایینی کاهش داشته است در حالی که نیروی برشی طبقات میانی تغییر

چندانی نکرده است. این میزان کاهش با افزایش نسبت K_d/K بیشتر شده است. هرچند در مورد روش کنترل غیرفعال برعکس بوده و افزایش نسبت K_d/K باعث افزایش نیروی برشی حداکثر طبقات شده است.

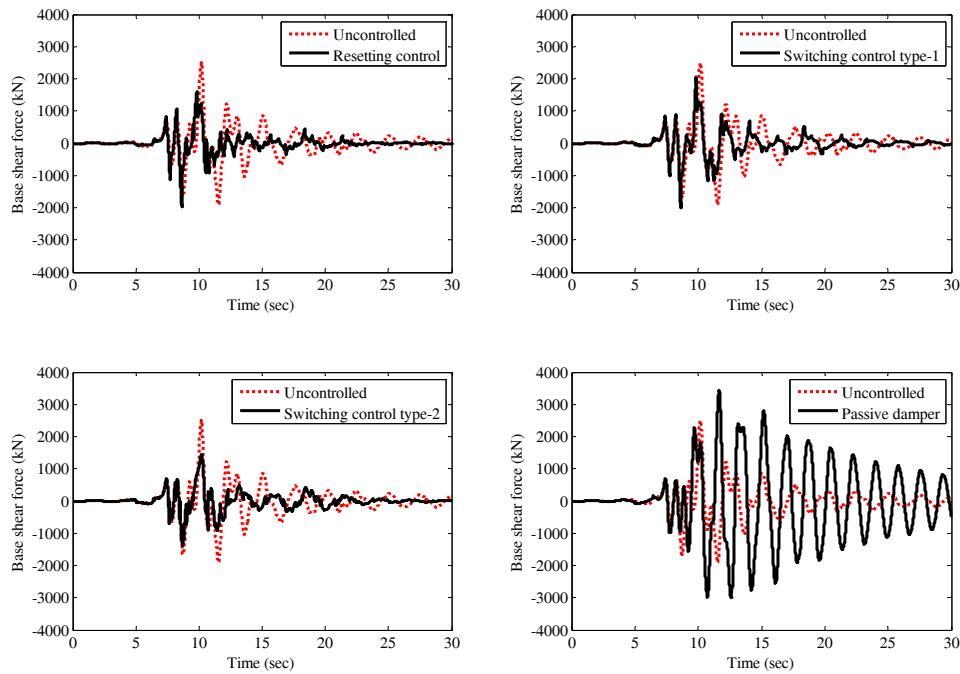
شکل ۶-۲۳ پاسخ زمانی برش پایه را برای $K_d=K$ نشان می‌دهد. همان طوری که در شکل مشاهده می‌شود به جز روش کنترل غیر فعال، سایر روش‌های کنترل مقدار برش پایه را کاهش داده‌اند.

به منظور نشان دادن عملکرد میراگر و نحوه باز تنظیم شدن آن در روش‌های مختلف کنترل، منحنی نیرو-تغییرمکان میراگر به همراه پاسخ زمانی جابجایی نسبی و پاسخ زمانی نیروی میراگر برای $K_d=K$ در تراز بام قاب ۱۵ طبقه در شکل ۶-۲۴ نشان داده شده است. همان طوری که در شکل مشاهده می‌شود، میراگر مطابق رفتار پیش‌بینی شده عمل کرده است. با این وجود تعدادی باز تنظیم شدن‌های ناخواسته در روش کنترل باز تنظیمی و قطع و وصل نوع ۲ مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از عملکرد نامناسب الگوریتم کنترلی به کار رفته در تشخیص نقاط باز تنظیم شدن میراگر باشد. با دقیقت در شکل مشاهده می‌شود که در روش کنترل باز تنظیمی دامنه جابجایی نسبت به سایر روش‌های کنترل سریع‌تر افت کرده، به طوری که عملاً بعد از ۴ سیکل جابجایی دامنه تقریباً به صفر رسیده است. این موضوع بیانگر عملکرد بهتر این روش در اتلاف انرژی وارد شده به سیستم است.

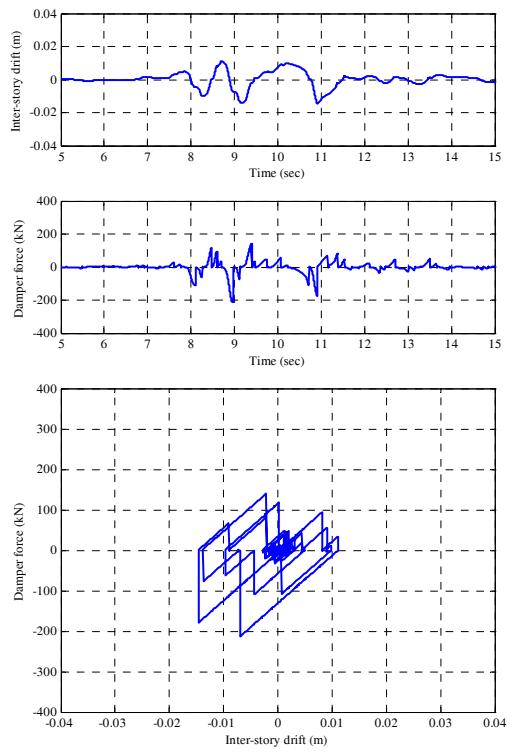


شکل ۶-۲۲- نیروی برشی حداقل طبقات تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA (الف)

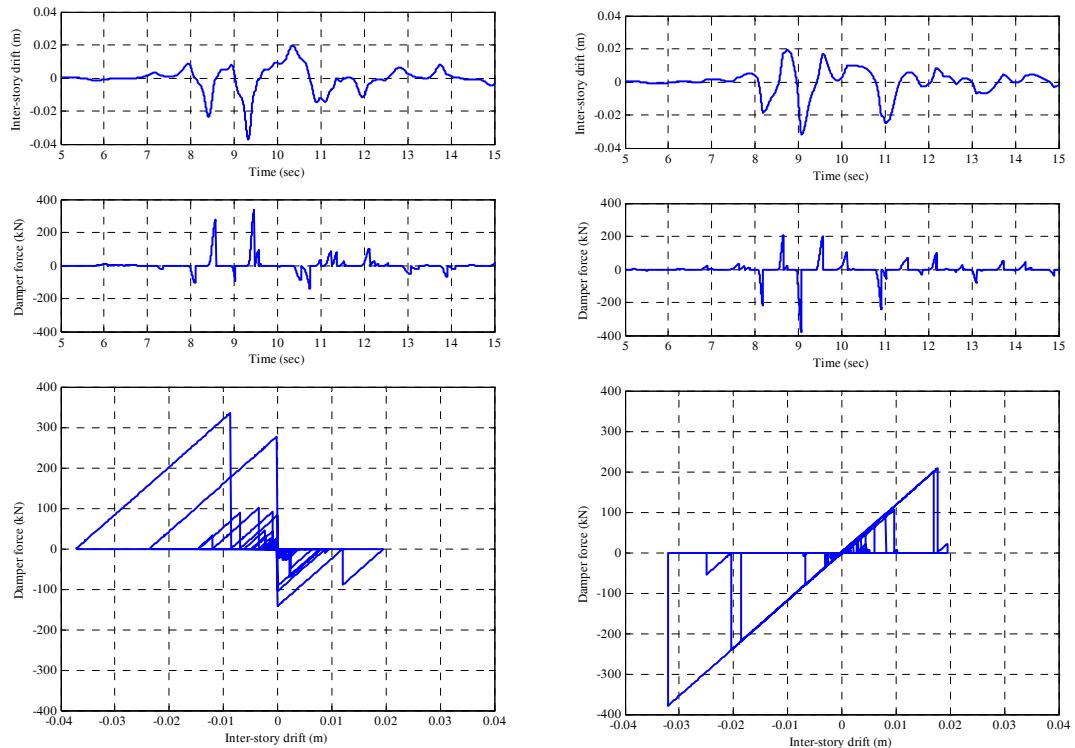
$K_d=K$ (ج) $K_d=0.5K$ (ب) $K_d=0.25K$



شکل ۶-۲۳- پاسخ زمانی برش پایه قاب ۱۵ طبقه تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA وقتی $K_d=K$



(الف)



(ج)

(ب)

شکل ۶-۲۴- پاسخ زمانی جابجایی نسی، نیروی میراگر و منحنی نیرو-تغییرمکان میراگر در تراز بام

قاب ۱۵ طبقه تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA؛ (الف) روش کنترل باز تنظیمی،

(ب) روش کنترل قطع و وصل نوع ۱، (ج) روش کنترل قطع و وصل نوع ۲.

فصل هفتم

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در دو دهه گذشته وقوع زلزله‌های حوزه نزدیک موجب خرابی‌ها و آسیب‌های شدیدی به سازه‌ها و شریان‌های حیاتی گردیده که مطابق آین‌نامه‌های موجود طراحی و ساخته شده بودند. این آسیب‌ها عمدتاً به ویژگی‌های خاص زلزله‌های حوزه نزدیک (از جمله ماهیت پالس‌گونه این نوع زلزله‌ها) نسبت داده شده است. با توجه به قرارگیری اکثر شهرهای پرجمعیت ایران در نواحی نزدیک گسل، لزوم ارایه راهکارهای جدید برای مقابله با زلزله‌های حوزه نزدیک بسیار مهم و حائز اهمیت است.

در این رساله ضمن ابداع و معرفی یک میراگر تنظیم شونده جدید، نقش آن در کاهش پاسخ‌های سازه در معرض زلزله‌های حوزه نزدیک مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور، دو نمونه اولیه از میراگر ابداعی ساخته شده و در Structural Dynamics Laboratory دانشگاه پلی‌تکنیک هنگ‌کنگ مورد تست قرار گرفته است.

میراگر ابداعی در واقع یک میراگر نیمه‌فعال باز تنظیم شونده جدید است که در آن به طور همزمان از دو نوع سیال عملکردی (گاز تحت فشار و سیال مغناطیسی) استفاده شده است. این میراگر شامل یک سیستم سیلندر-پیستون و یک شیر کنترل دو حالته (باز-بسته) به همراه یک شیر مغناطیسی است که بر روی یک لوله کنار گذر که دو طرف سیلندر را به یکدیگر متصل می‌سازد، نصب شده‌اند. سیلندر محتوی گاز تحت فشار و سیال مغناطیسی است که توسط دو پیستون جداگانه متحرک از یکدیگر جدا شده‌اند. دو سیال به کار رفته در میراگر ابداعی هر یک نقشی متمایز ایفا می‌کنند. گاز تحت فشار نقش یک فنر را دارد که با تغییر فشار گاز و یا تغییر طول محفظه گاز، سختی میراگر را تنظیم می‌کند. در میراگر ابداعی به منظور دستیابی به حداکثر میزان اتلاف انرژی در هنگام باز تنظیم شدن میراگر، از سیال مغناطیسی استفاده شده است. هنگامی که میراگر تحریک می‌شود، انرژی ورودی در گاز تحت فشار ذخیره می‌شود. با باز تنظیم شدن میراگر که بوسیله باز کردن شیر کنترل در زمان مقتضی انجام می‌شود، انرژی ذخیره شده در گاز تحت فشار آزاد شده و باعث جریان یافتن سیال مغناطیسی در لوله کنار گذر و شیر مغناطیسی می‌شود که به نوبه خود موجب استهلاک انرژی ذخیره شده از طریق مکانیزم اتلاف انرژی تعییه شده در شیر مغناطیسی و تبدیل آن به گرمایش شود.

طراحی خاص میراگر ابداعی باعث حذف محدودیتهای رایج میراگرهای باز تنظیم شونده و فراهم آوردن ویژگی‌های منحصر به فردی به شرح زیر شده است:

- تنظیم نیروی مقاوم میراگر متناسب با نیاز طراحی بدون نیاز به تعویض میراگر
- تنظیم کورس پیستون متناسب با نیاز طراحی بدون نیاز به تعویض میراگر
- عدم حساسیت رفتاری میراگر به نحوه نصب در سازه
- عدم نیاز به انباشتگر
- امکان کنترل نامتمرکز میراگر
- امکان دستکاری نمودن رفتار هیسترزیس میراگر متناسب با تقاضای طراحی یا بهسازی
- رفتار ایمن در صورت خرابی سیستم‌های کنترلی میراگر

این ویژگی‌ها باعث شده تا با تغییر مشخصات دینامیکی میراگر یک محدوده وسیع برای اعمال کنترل به میراگر فراهم شود به طوری که سختی، میرایی و رفتار هیسترزیس میراگر همگی قابل کنترل هستند.

در این تحقیق با توجه به بدیع بودن طرح میراگر با استفاده از روابط شناخته شده رفتار گازها و سیالات، مدل‌های ریاضی برای رفتار نیرو-تغییرمکان میراگر توسعه داده شد. بررسی و مقایسه مدل‌های ریاضی و تست‌های آزمایشگاهی حاکی از آن است که:

- سختی میراگر با فشار گاز ارتباط مستقیم دارد. به طوری که می‌توان با افزایش فشار گاز بدون تعویض میراگر، به سختی بسیار زیاد دست یافت.

- رابطه بین سختی میراگر و فشار گاز بستگی به نسبت دامنه به طول اولیه مخزن گاز (x/L_{0G}) دارد.
- مدل خطی پیشنهادی برای نسبت‌های x/L_{0G} کوچک‌تر از ۶۶٪ تطبیق مناسبی با نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها دارد.

- برای نسبت L_{0G}/x بزرگ‌تر از ۶۶٪، مدل غیرخطی پیشنهادی رفتار میراگر را به خوبی پیش‌بینی کرده و انطباق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.
- آزمایش‌ها نشان می‌دهد که برخلاف پیش‌بینی مدل‌های ریاضی، حتی در حالت شیر-باز نیز مقداری نیروی مقاوم در میراگر وجود دارد. با این حال مقدار این نیرو کم بوده و مدل‌های ریاضی پیشنهادی قابل استفاده می‌باشند.
- پس از اعتبار سنجی مدل‌های ریاضی، در ادامه کار به منظور بررسی اثر میراگرهای پیشنهادی در کاهش پاسخ سازه تحت زلزله‌های حوزه نزدیک، رفتار این میراگرهای با استفاده از شبیه‌سازی عددی بر روی یک سازه یک درجه آزاد مدل‌سازی گردید. نتایج شبیه‌سازی به شرح زیر است:
 - استفاده از میراگر ابداعی باعث کاهش سطح انرژی ورودی به سازه یک درجه آزاد می‌شود. این موضوع تقاضای اتلاف انرژی در سازه را کاهش می‌دهد که در واقع یکی از اهداف اصلی کنترل لرزه‌ای سازه‌ها است.
 - عمدۀ انرژی ورودی به سیستم توسط میراگر تلف شده است و سهم انرژی تلف شده توسط مکانیزم میرایی ویسکوز در مقایسه با روش کنترل غیرفعال و سیستم کنترل نشده بسیار کم شده است.
 - استفاده از میراگر ابداعی در سیستم یک درجه آزاد باعث اتلاف سریع‌تر انرژی ورودی به سازه شده است.

در مرحله نهایی به منظور ارزیابی جامع عملکرد میراگر ابداعی، رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه مجهز به میراگرهای ابداعی شبیه‌سازی شده و پاسخ آن‌ها تحت ۱۰ زلزله حوزه نزدیک مختلف مورد بررسی قرار گرفت. پریود مود اول ساختمان‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه مطالعه شده به ترتیب برابر ۱/۴۲ ثانیه، ۱/۹۴ ثانیه و ۲/۵ ثانیه است. ساختمان‌های مورد مطالعه به ترتیب معرف سازه‌های کوتاه، متوسط و بلند می‌باشند که می‌تواند نحوه عملکرد این میراگرهای را به طور جامع تری نمایان سازد. بدین منظور، معادلات فضایی حالت برای سیستم‌های کنترل شده و کنترل نشده توسعه

داده شد. شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار MATLABTM و SimulinkTM انجام شده است. در این شبیه‌سازی اثر روش‌های مختلف کنترل و همچنین تاثیر سختی میراگر بر رفتار ساختمان‌های مورد مطالعه بررسی شده است. روش‌های کنترل به کار رفته در این مطالعه شامل روش‌های کنترل نیمه‌فعال (روش کنترل باز تنظیمی، روش کنترل قطع و وصل نوع ۱ و روش کنترل قطع و وصل نوع ۲) و روش کنترل غیرفعال است. نتایج شبیه‌سازی‌های عددی نشان می‌دهد که:

- تقریباً در تمام روش‌های کنترل مطالعه شده، جابجایی حداکثر و جابجایی نسبی حداکثر نسبت به حالت کنترل نشده کاهش یافته است. این میزان کاهش با افزایش نسبت K_d/K ، افزایش یافته است.
- در اکثر زلزله‌ها بیشترین میزان کاهش جابجایی نسبی حداکثر مربوط به روش کنترل باز تنظیمی است. در روش کنترل باز تنظیمی، میزان کاهش جابجایی نسبی حداکثر برای ساختمان ۵ طبقه حدود ۶۵٪-۳۰٪، ساختمان ۱۰ طبقه حدود ۶۰٪-۳۵٪ و برای ساختمان ۱۵ طبقه در حدود ۵۰٪-۳۰٪ است. میزان این کاهش برای روش کنترل قطع و وصل نوع ۱ در ساختمان ۵ طبقه حدود ۴۵٪-۱۵٪، ساختمان ۱۰ طبقه حدود ۴۰٪-۲۰٪ و در ساختمان ۱۵ طبقه در حدود ۳۵٪-۱۵٪ است. این میزان در روش کنترل قطع و وصل نوع ۲ در ساختمان ۵ طبقه حدود ۲۵٪-۱۰٪، ساختمان ۱۰ طبقه حدود ۳۰٪-۱۵٪ و برای ساختمان ۱۵ طبقه در حدود ۳۰٪-۱۵٪ است.

▪ مقایسه پاسخ جابجایی نسبی روش‌های کنترل مطالعه شده نشان می‌دهد که عملکرد روش‌های کنترل نیمه‌فعال با افزایش ارتفاع تغییر چندانی نمی‌کند.

▪ روش کنترل غیرفعال (که معادل افزایش سختی سازه است) تحت زلزله‌های مختلف، عملکرد متفاوتی از خود نشان داده است. به طوری که در ساختمان‌های ۵ و ۱۰ طبقه در برخی زلزله‌ها باعث کاهش پاسخ شده و در برخی دیگر باعث افزایش پاسخ جابجایی نسبی حداکثر شده است.

در ساختمان ۱۵ طبقه، روش کنترل غیرفعال در اکثر زلزله‌ها باعث کاهش پاسخ جابجایی حداکثر و جابجایی نسبی حداکثر در حدود ۳۵٪-۱۵٪ شده است.

▪ تقریباً تمام روش‌های کنترل، تحت اکثر زلزله‌های مورد مطالعه، باعث افزایش قابل توجه شتاب مطلق حداکثر ساختمان‌ها شده‌اند.

▪ تمام روش‌های کنترل نیمه‌فعال شتاب RMS طبقات را کاهش می‌دهند که این میزان کاهش با افزایش نسبت K_d/K ، افزایش می‌یابد.

▪ میزان کاهش شتاب RMS در روش کنترل باز تنظیمی برای ساختمان ۵ طبقه در حدود ۹٪-۲۵٪، ساختمان ۱۰ طبقه حدود ۲۰٪-۷۰٪ و برای ساختمان ۱۵ طبقه در حدود ۶۵٪ است. میزان کاهش شتاب RMS در روش کنترل قطع و وصل نوع ۱، برای ساختمان ۵ طبقه در حدود ۱۰٪-۷۵٪، ساختمان ۱۰ طبقه حدود ۱۰٪-۵۵٪ و برای ساختمان ۱۵ طبقه در حدود ۱۰٪-۵۵٪ است. در روش کنترل قطع و وصل نوع ۲ میزان کاهش برای ساختمان ۵ طبقه در حدود ۱۵٪-۷۵٪، ساختمان ۱۰ طبقه حدود ۱۵٪-۶۰٪ و برای ساختمان ۱۵ طبقه در حدود ۶۰٪-۱۰٪ است.

▪ میزان کاهش شتاب RMS در طبقات بالا بیش از طبقات پایین است و این میزان با افزایش نسبت K_d/K افزایش می‌یابد.

▪ میزان کاهش شتاب RMS طبقات، با افزایش ارتفاع ساختمان‌ها کمتر می‌شود.

▪ روش کنترل قطع و وصل نوع ۲ در تمام زلزله‌ها باعث کاهش نیروی برشی حداکثر ساختمان‌های مورد مطالعه شده است. میزان کاهش نیروی برشی حداکثر با افزایش نسبت K_d/K ، افزایش یافته است. این یکی از ویژگی‌های روش کنترل قطع و وصل نوع ۲ است که در کنار کاهش پاسخ جابجایی نسبی حداکثر و شتاب RMS طبقات توانسته است نیروی برشی

حداکثر طبقات را نیز به طور موثری کاهش دهد که این نکته می‌تواند در مقاومسازی ساختمان‌ها مورد توجه قرار گیرد.

- در تمام روش‌های کنترل نیمه‌فعال، دامنه جابجایی طبقات با تعداد سیکل‌های بسیار کمتری نسبت به ساختمان‌های کنترل نشده افت کرده و به صفر می‌رسد.
- روش کنترل باز تنظیمی باعث توزیع یکنواخت‌تر جابجایی نسبی در ارتفاع ساختمان ۵ طبقه شده است. این در حالیست که در مورد ساختمان ۱۰ و ۱۵ طبقه تقریباً هر سه روش کنترل باز تنظیمی، قطع و وصل نوع ۱ و قطع و وصل نوع ۲ باعث توزیع یکنواخت‌تر جابجایی نسبی در ارتفاع این ساختمان‌ها شده‌اند. این موضوع نشان می‌دهد که استفاده از میراگر ابداعی، با یکنواخت کردن توزیع نیرو در ارتفاع ساختمان، مانع از تمرکز نیروی زلزله در یک طبقه خاص می‌شود.

تحقیقات آینده

در این تحقیق با استفاده از شبیه‌سازی عددی نشان داده شد که میراگرهای باز تنظیم شونده عملکرد امید بخشی در کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌های در معرض زلزله‌های حوزه نزدیک دارند. تحقیقات بیشتر در این حوزه را می‌توان به شرح ذیل پیشنهاد نمود:

- استفاده از مدل غیرخطی میراگر
- مدلسازی سازه‌ها بصورت غیر الاستیک و بررسی اثر تغییرشکل‌های غیرخطی در رفتار کلی سازه‌های مجهز به میراگرهای باز تنظیم شونده
- مطالعه اثر تاخیر زمانی میراگر در هنگام باز تنظیم شدن، بر روی رفتار کلی سازه
- مطالعه توزیع مناسب و بهینه میراگر در ارتفاع سازه
- با توجه به توانایی‌های منحصر به فرد میراگر ابداعی، بررسی کاربر آن در سیستم‌های سازه‌ای غیر ساختمنی نظری سیستم تعلیق خودرو پیشنهاد می‌گردد.

فهرست منابع و مراجع

- [1] International Code Council, I. (1997). “*1997 Uniform Building Code (UBC 97)-Volume 2*.”
- [2] Stewarta, J. P., Chioub, S.-J., Brayc, J. D., Gravesd, R. W., Somervilled, P. G., and Abrahamson, N. A. (2002). “Ground motion evaluation procedures for performance-based design.” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22, pp 765–772.
- [3] Somerville, P. (1997). “Engineering characteristics of near fault ground motion.” *Proc., SMIP97 Seminar on Utilization of Strong-Motion Data*, Los Angeles, California, US.
- [4] Somerville, P. G. (2005). “Engineering characterization of near fault ground motion.” *Proc., New Zealand Society for Earthquake Engineering Conference-Planing and Engineering for Performance in Earthquakes (2005 NZSEE)*, Taupo, New Zealand.
- [5] Naeim, F. (2001). “*The seismic design handbook- 2nd Edition*”, Kluwer Academic Publishers.
- [6] Alavi, B., and Krawinkler, H. (2001). “Effect of near-fault ground motion on frames structures.” The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, Stanford, US, *Report No. 138*.
- [7] Bozorgnia, Y., and Bertero, V. V. (2004). “*Earthquake engineering handbook from engineering seismology to performance-based engineering*”, CRC Press LLC.
- [8] Malhotra, P. K. (1999). “Response of buildings to near-field pulse-like ground motions.” *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 28(11), pp 1309–1326.
- [9] Chopra, A. K., and Chatpan Chintanapakdee (2001). “Comparing response of SDF systems to near-fault and far-fault earthquake motions in the context of spectral regions.” *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 30(12), pp 1769-1789.
- [10] Chai, J.-F., Liao, W.-I., Teng, T.-J., and Loh, C.-H. (2001). “Current development of seismic design code to consider the near-fault effect in taiwan.” *Earthquake Engineering and Engineering Seismology*, 3(2), pp 47-56.
- [11] Chen, W.-F., and Scawthorn, C. (2003). “*Earthquake engineering handbook*”, CRC Press LLC.
- [12] Symans, M. D., and Constantinou, M. C. (1999). “Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review.” *Engineering Structures*, 21(6), pp 469-487.
- [13] Skinner, R. I., Robinson, W. H., and Mc-Verry, G. H. (1993). “*An Introduction to Seismic Isolation*”, Wiley and Sons, New York.

- [14] Yang, J. N., and Agrawal, A. K. (2002). "Semi-active hybrid control systems for nonlinear buildings against near-field earthquakes." *Engineering Structures*, 24(3), pp 271-280.
- [15] Hall, J. F. (1995). "Parameter study of the response of moment-resisting steel frame buildings to near-source ground motions." California Institute of Technology, Earthquake Engineering Research Laboratory, Pasadena, California, US, *Report No. EERL 95-08*.
- [16] Hall, J. F., Heaton, T. H., Halling, M. W., and Wald, D. J. (1995). "Near-source ground motion and its effects on flexible buildings." *Earthquake Spectra*, 11(4), pp 569-605.
- [17] Hall, J. F. (1997). "Seismic response of buildings to near-source ground motions." California Institute of Technology, Earthquake Engineering Research Laboratory, Pasadena, California, US, *Report No. EERL 97-05*.
- [18] Liao, W.-I., Loh, C.-H., and Wan, S. (2001). "Earthquake responses of RC moment frames subjected to near-fault ground motions." *The Structural Design of Tall Buildings*, 10(3), pp 219-229.
- [19] Alavi, B., and Krawinkler, H. (2004). "Behavior of moment-resisting frame structures subjected to near-fault ground motions." *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 33(6), pp 687-706.
- [۲۰] لطف الهی، ا. (۱۳۸۱). "بررسی رفتار دینامیکی غیرخطی قابهای فولادی خمشی بلند تحت اثر رکوردهای نزدیک گسل و دور از گسل." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
- [۲۱] جعفرخانی، ر. (۱۳۸۲). "بررسی ویژگی‌های زمین شناختی محدوده نزدیک گسل." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
- [۲۲] عدالت، م. (۱۳۸۲). "بررسی تأثیر میرایی و تسلیم روی طیفهای رکوردهای زلزله‌های نزدیک گسل." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
- [۲۳] بدرلو، ب. ا. (۱۳۸۳). "رفتار دینامیکی غیرخطی قابهای فولادی برونو محور تحت تأثیر زلزله‌های نزدیک گسل." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
- [۲۴] دردایی، ص. (۱۳۸۳). "پاسخ غیر ارتجاعی ساختمان‌ها تحت اثر همزمان مولفه‌های افقی حرکات زمین نزدیک گسل." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
- [۲۵] قادری ، پ. (۱۳۸۴). "بررسی تأثیر زلزله‌های حوزه نزدیک بر رفتار لرزه‌ای سازه‌های با پریود بالا." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی، تهران، ایران.
- [۲۶] خسروی ، ح. (۱۳۸۴). "بررسی پاسخ سازه‌ها به حرکات پالسی شکل زمین در زلزله‌های نزدیک گسل." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی، تهران، ایران.
- [۲۷] فتوحی اردکانی ، م. ک. (۱۳۸۴). "اثر تحریک‌های دو جهتی در زلزله‌های نزدیک گسل." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی، تهران، ایران.

- [28] Tirca, L.-D., Foti, D., and Diaferio, M. (2003). "Response of middle-rise steel frames with and without passive dampers to near-field ground motions." *Engineering Structures*, 25(2), pp 169-179.
- [29] Xu, Z., Agrawala, A. K., He, W.-L., and Tan, P. (2007). "Performance of passive energy dissipation systems during near-field ground motion type pulses." *Engineering Structures*, 29(2), pp 224-236.
- [30] Providakis, C. P. (2008). "Effect of LRB isolators and supplemental viscous dampers on seismic isolated buildings under near-fault excitations" *Engineering Structures*, 30(5), pp 1187-1198.
- [31] Providakis, C. P. (2009). "Effect of supplemental damping on LRB and FPS seismic isolators under near-fault ground motions." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(1), pp 80-90.
- [32] اقمشہ ائی، غ. (۱۳۸۶). "ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه‌های جداسازی شده." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.
- [33] Spencer, B. F., and Nagarajaiah, S. (2003). "State of the art of structural control." *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, (7)129, pp 845-856.
- [34] Kobori, T., Takahashi, M., Nasu, T., Niwa, N., and Ogasawara, K. (1993). "Seismic response controlled structure with active variable stiffness system." *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 22(11), pp 925–941.
- [35] Akbay, Z., and Aktan, H. M. (1991). "Actively regulated friction slip devices." *Proc., 6th Canadian Conf. Earthquake Engineering*, Toronto, Canada.
- [36] Pandya, J., Akbay, Z., Uras, M., and Aktan, H. (1996). "Experimental implementation of hybrid contrl." *Proc., Structures Congress XIV*, Chicago, IL.
- [37] Kannan, S., Uras, H. M., and Aktan, H. M. (1995). "Active control of building seismic response by energy dissipation." *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, pp 747-759.
- [38] Kawashima, K., Unjoh ,S., Iida, H., and Mukai, H. (1992). "Effectiveness of the variable damper for reducing seismic response of highway bridges." *Proc., Second U.S.–Japan Workshop on Earthquake Protective Systems for Bridges*, PWRI, Tsukuba Science City, Japan.
- [39] Casciati ,F., Magonette, G., and Marazzi, F. (2006). "*Technology of semiactive devices and applications in vibration mitigation*", John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England.
- [40] Casciati, F., Stefano, A. D., and Matta, E. (2003). "Simulating a conical tuned liquid damper." *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*(11), pp 353-370.
- [41] Behrooz, M., Wang, X., and Gordaninejad, F. (2010). "A new semi active-passive isolator." *Proc., 5th World Conference on Structural Control and Monitoring*, Tokyo, Japan.

- [42] Deng, H. X., and Gong, X. L. (2008). "Application of magnetorheological elastomer to vibration absorber." *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 13(9), pp 1938-1947.
- [43] Zhou, Y. (2009). "MR elastomers for structural control." Master of Engineering Thesis, University of Wollongong, Wollongong.
- [44] Jabbari, F., and Bobrow, J. E. (2002). "Vibration suppression with resettable device." *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*, 128(9), pp 916-924.
- [45] Bobrow, J. E., Jabbari, F., and Thai, K. (1995). "An active truss element and control law for vibration suppression." *Smart Materials and Structures*, 4(4), pp 264-269.
- [46] Bobrow, J. E., and Jabbari, F. (1997). "A high-performance semi-active controller for structural vibration suppression." *Smart Structures and Integrated Systems - Smart Structures and Materials 1997*, 3041, pp 67-74.
- [47] Thai, K., Jabbari, F., and Bobrow, J. E. (1997). "Structural control via semi-active and hybrid control." *Proc., American Control Conference*, Albuquerque, New Mexico, USA.
- [48] Bobrow, J. E., Jabbari, F., and Thai, K. (2000). "A new approach to shock isolation and vibration suppression using a resetable actuator." *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of the (ASME)*, 122(3), pp 570-573.
- [49] Yang, J. N., Kim, J. H., and Agrawal, A. K. (2000). "Resetting semiactive stiffness damper for seismic response control." *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 126(12), pp 1427-1433.
- [50] Agrawal, A. K., and He, W. L. (2001). "Control of seismically excited cable-stayed bridge using a resetting semi-active stiffness damper." *Proc., American Control Conference (ACC)*, Arlington, VA, USA.
- [51] Djajakesukma, S. L., Samali, B., and Nguyen, H. (2002). "Study of a semi-active stiffness damper under various earthquake inputs." *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31(10), pp 1757-1776.
- [52] Kurino, H., Tagami, J., Shimizu, K., and Kobori, T. (2003). "Switching oil damper with built-in controller for structural control." *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 129(7), pp 895-904.
- [53] Agrawal, A. K., Yang, J. N., and He, W. L. (2003). "Applications of some semiactive control systems to benchmark cable-stayed bridge." *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 129(7), pp 884-894.
- [54] Barroso, L. R., Chase, J. G., and Hunt, S. (2003). "Resettable smart dampers for multi-level seismic hazard mitigation of steel moment frames." *Journal of Structural Control*, 10(1), pp 41-58.
- [55] Shimizu, K., Yamada, T., Tagami, J., and Kurino, H. (2004). "Vibration tests of actual buildings with semi-active switching oil damper." *Proc., 13th World Conference on Earthquake Engineering (13WCEE)*, Vancouver, BC, Canada.

- [56] Leavitt, J., Jabbari, F., and Boborw, J. E. (2005). "Optimal control and performance of variable stiffness devices for structural control." *Proc., American Control Conference (ACC)*, Portland, OR, USA.
- [57] Chase, J. G., Mulligan, K. J., Gue, A., Mander, J. B., Alnot, T., Rodgers, G., Deam, B., Cleeve, L., and Heaton, D. (2005). "Resetable devices with customised performance for semi-active seismic hazard mitigation of structures." *Proc., New Zealand Society for Earthquake Engineering Conference- Planing and Engineering for Performance in Earthquakes (2005 NZSEE)*, Taupo, New Zealand.
- [58] Leavitt, J., Bobrow, J. E., Jabbari, F., and Yang, J. N. (2006). "Application of a high-pressure gas semi-active resettable damper to the benchmark smart base-isolated building." *Structural Control and Health Monitoring*, 13, pp 748-757.
- [59] Chase, J ,Mulligan, K., Gue, A., Alnot, T., Rodgers, G., Mander, J., Elliott, R., Deam, B., Cleeve, L., and Heaton, D. (2006). "Re-shaping hysteretic behaviour using semi-active resettable device dampers." *Engineering Structures*, 28(10), pp 1418-1429.
- [60] Mulligan, K. J., Fougere, M., Mander, J. B., Chase, J. G., Deam, B. L., Danton, G., and Elliot, R. B. (2006). "Hybrid experimental analysis of semi-active rocking wall systems." *Proc., New Zealand Society for Earthquake Engineering Conference- Remembering Napier 1931, Building on 75 Years of Earthquake Engineering in New Zealand (2006 NZSEE)*, Napier, New Zealand.
- [61] Leavitt, J., Jabbari, F., and Bobrow, J. E. (2007). "Optimal performance of variable stiffness devices for structural control." *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 129(2), pp 171-177.
- [62] Yang, J. N., Bobrow, J., Jabbari, F., Leavitt, J., Cheng, C. P., and Lin, P. Y. (2007). "Full-scale experimental verification of resetable semi-active stiffness dampers." *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36(9), pp 1255-1273.
- [63] Rodgers, G. W., Mander, J. B., Chase, J. G., Mulligan, K. J., Deam, B. L., and Carr, A. (2007). "Re-shaping hysteretic behaviour-spectral analysis and design equations for semi-active structures." *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36(1), pp 77-100.
- [64] Mulligan, K. J., Chase, J. G., Mander, J. B., and Elliot, R. (2007). "Semi-active resetable actuators incorporating a high pressure air source." *Proc., New Zealand Society for Earthquake Engineering Conference- Performance by Design- Can We predict It? (2007 NZSEE)*, Palmerstone North, New Zealand.
- [65] Chase, J. G., Rodgers, G. W., Mulligan, K. J., Mander, J. B., and Dhakal, R. P. (2007). "Probabilistic analysis and non-linear semi-active base isolation spectra for aseismic design." *Proc., 8th Pacific Conference on Earthquake Engineering (8PCEE)*, Singapore.
- [66] Chey, M. H., Carr, A. J., Chase, J. G., and Mander, J. B. (2008). "Resetable tuned mass damper and its application to isolated stories building system." *Proc., 14th World Conference on Earthquake Engineering (14WCEE)*, Beijing, China.

- [67] Franco-Anaya, R., Carr, A. J., and Chase, J. G. (2008). "Semi-active resettable devices for seismic protection of civil engineering structures." *Proc., 14th World Conference on Earthquake Engineering (14WCEE)*, Beijing, China.
- [68] Chen, X. Q., Chase, J. G., Mulligan, K. J., Rodgers, G. W., and Mander, J. B. (2008). "Novel controllable semiactive-devices for reshaping structural response." *IEEE-ASME Transactions on Mechatronics*, 13(6), pp 647-657.
- [69] Mulligan, K. J., Chase, J. G., Mander, J. B., Rodgers, G. W., Elliott, R. B., Franco-Anaya, R., and Carr, A. J. (2009). "Experimental validation of semi-active resettable actuators in a 1/5th scale test structure." *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 38(4), pp 517-536.
- [70] Nagarajaiah, S., Reinhorn, A., Constantinou, M., and Taylor, D. (2009). "Variation of supplemental stiffness and damping using adaptive fluid spring and damper (ASD)." *Proc., NSF Engineering Research and Innovation Conference*, Honolulu, Hawaii, USA.
- [71] Mulligan, K. J., Chase, J. G., Mander, J. B., Rodgers, G. W., and Elliott, R. B. (2010). "Nonlinear models and validation for resettable device design and enhanced force capacity." *Structural Control and Health Monitoring*, 17(3), pp 301-316.
- [72] Samali, B., Djajakesukma, S. L., and Nguyen, H. (2001). "Effectiveness of semi-active stiffness damper in a five-storey model." *Computational Mechanics*, 1(2), pp 1425-1430.
- [73] Mulligan, K. (2007). "Experimental and analytical studies of semi-active and passive structural control of buildings." Ph.D. Thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- [74] LordCorporation "Online technical library." <<http://www.lord.com>>
- [75] Jolly, M. R., Bender, J. W., and Carlson, J. D. (1999). "Properties and applications of commercial magnetorheological fluids." *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 10(1), pp 5-13.
- [76] Wang, D. H., Ai, H. X., and Liao, W. H. (2009). "A magnetorheological valve with both annular and radial fluid flow resistance gaps." *Smart Materials and Structures*, 18(11), pp 115001.
- [77] Wang, X., Gordaninejad, F., Hitchcock, G., Bangrakulur, K., Fuchs, A., Elkins, J., Evrensel, C., Dogruer, U., Ruan ,S., Siino, M., and Kerns, M. (2004). "A new modular magneto-rheological fluid valve for large-scale seismic applications." *Proc., Smart Structures and Materials 2004: Damping and Isolation*, San Diego, CA, USA.
- [78] Grunwald, A., and Olabi, A. G. (2008). "Design of magneto-rheological (MR) valve." *Sensors and Actuators a-Physical*, 148(1), pp 211-223.
- [79] Gordaninejad, F., Wang, X., Hitchcock, G., Bangrakulur, K., Ruan, S., and Siino, M. (2010). "Modular high-force seismic magneto-rheological fluid damper." *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 136(2), pp 135-143.

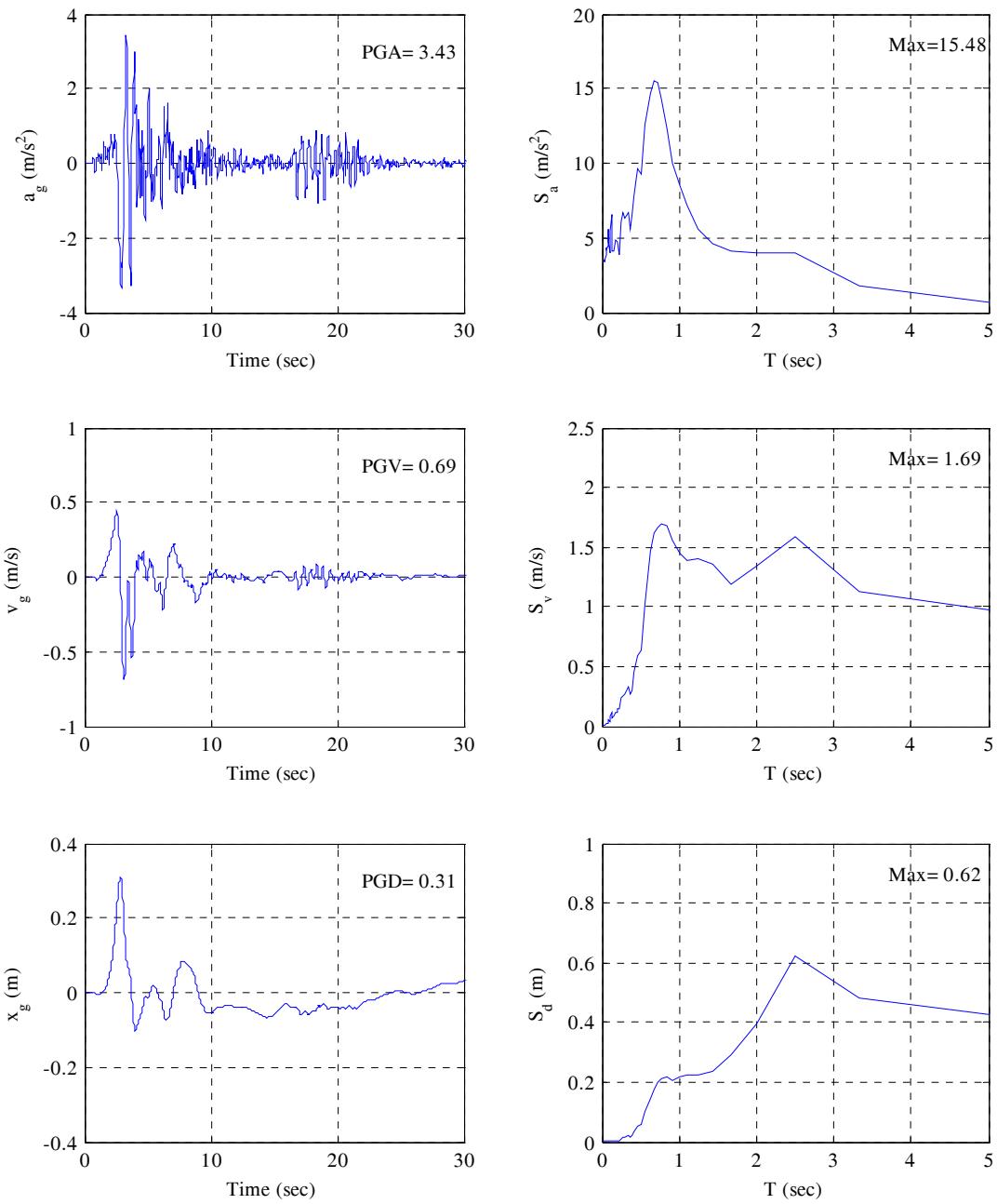
- [80] Hitchcock, G. H., Wang, X., and Gordaninejad, F. (2007). “A new bypass magnetorheological fluid damper.” *Journal of Vibration and Acoustics*, 129(5), pp 641-647.
- [81] Aydar, G., Wang ,X., and Gordaninejad, F. (2010). “A novel two-way-controllable magneto-rheological fluid damper.” *Smart Materials and Structures*, 19(6), pp 065024.
- [82] Sahin, H., Liu, Y., Wang, X., Gordaninejad, F., Evrensel, C., and Fuchs, A. (2007). “Full-scale magnetorheological fluid dampers for heavy vehicle rollover.” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 18(12), pp 1161-1167.
- [83] Yoo, J. H., and Wereley, N. M. (2002). “Design of a high-efficiency magnetorheological valve.” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 13(10), pp 679-685.
- [84] Hitchcock, G. H., Gordaninejad, F., and Wang, X. J. (2002). “A new by-pass, fail-safe, magneto-rheological fluid damper.” *Proc., SPIE Conference on Smart Materials and Structures*, San Diego, US.
- [85] Chooi, W., and Oyadiji, S. (2008). “Design, modelling and testing of magnetorheological (MR) dampers using analytical flow solutions.” *Computers and Structures*, 86(3-5), pp 473-482.
- [86] Chhabra, R. P., and Richardson, J. F. (1999). “*Non-Newtonian Flow In The Process Industries Fundamentals And Engineering Applications*”, Butterworth-Heinemann, Woburn, MA, US.
- [87] Chopra, A. K. (2007). “*Dynamics of structures- Theory and applications to earthquake engineering (3rd Edition)*”, Pearson Education Inc., Upper Saddle River, NJ 07458, US.
- [88] Rosenfeld, N. C., and Wereley, N. M. (2004). “Volume-constrained optimization of magnetorheological and electrorheological valves and dampers.” *Smart Materials and Structures*, 13(6), pp 1303-1313.
- [89] Nguyen, Q. H ,Han, Y. M., Choi, S. B., and Wereley, N. M. (2007). “Geometry optimization of MR valves constrained in a specific volume using the finite element method.” *Smart Materials and Structures*, 16(6), pp 2242-2252.
- [90] Nguyen, Q. H., Choi, S. B., and Wereley, N .M. (2008). “Optimal design of magnetorheological valves via a finite element method considering control energy and a time constant.” *Smart Materials and Structures*, 17(2), pp 025024.
- [91] Nguyen, Q. H., and Choi, S. B. (2009). “Optimal design of MR shock absorber and application to vehicle suspension.” *Smart Materials and Structures*, 18(3), pp 035012.
- [92] Nguyen, Q. H., and Choi, S. B. (2009). “Optimal design of a vehicle magnetorheological damper considering the damping force and dynamic range.” *Smart Materials and Structures*, 18(1), pp 015013.

- [93] Nguyen, Q. H., Choi, S. B., Lee, Y. S., and Han, M. S. (2009). "An analytical method for optimal design of MR valve structures." *Smart Materials and Structures*, 18(9), pp 095032.
- [۹۴] "مبحث ششم: بارهای وارد بر ساختمان." دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، معاونت نظام مهندسی و اجرای ساختمان، وزارت مسکن و شهرسازی، ۱۳۸۰.
- [۹۵] "آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰- ویرایش ۳)." کمیته دائمی بازنگری آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۸۴.
- [۹۶] "مبحث دهم: طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی." دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، معاونت نظام مهندسی و اجرای ساختمان، وزارت مسکن و شهرسازی، ۱۳۸۴.
- [97] Spencer, B. F., Christenson, R. E., and Dyke, S. J. (1999). "Next generation benchmark control problem for seismically excited buildings." *Proc., Second World Conference on Structural Control*, Kyoto, Japan.
- [98] Somerville, P., Smith, N., Punyamurthula, S., and Sun, J. (1997). "Development of ground motion time histories for phase ii of the fema/sac steel project." SAC Background Document Report, *Report No. SAC/BD-97/04*.

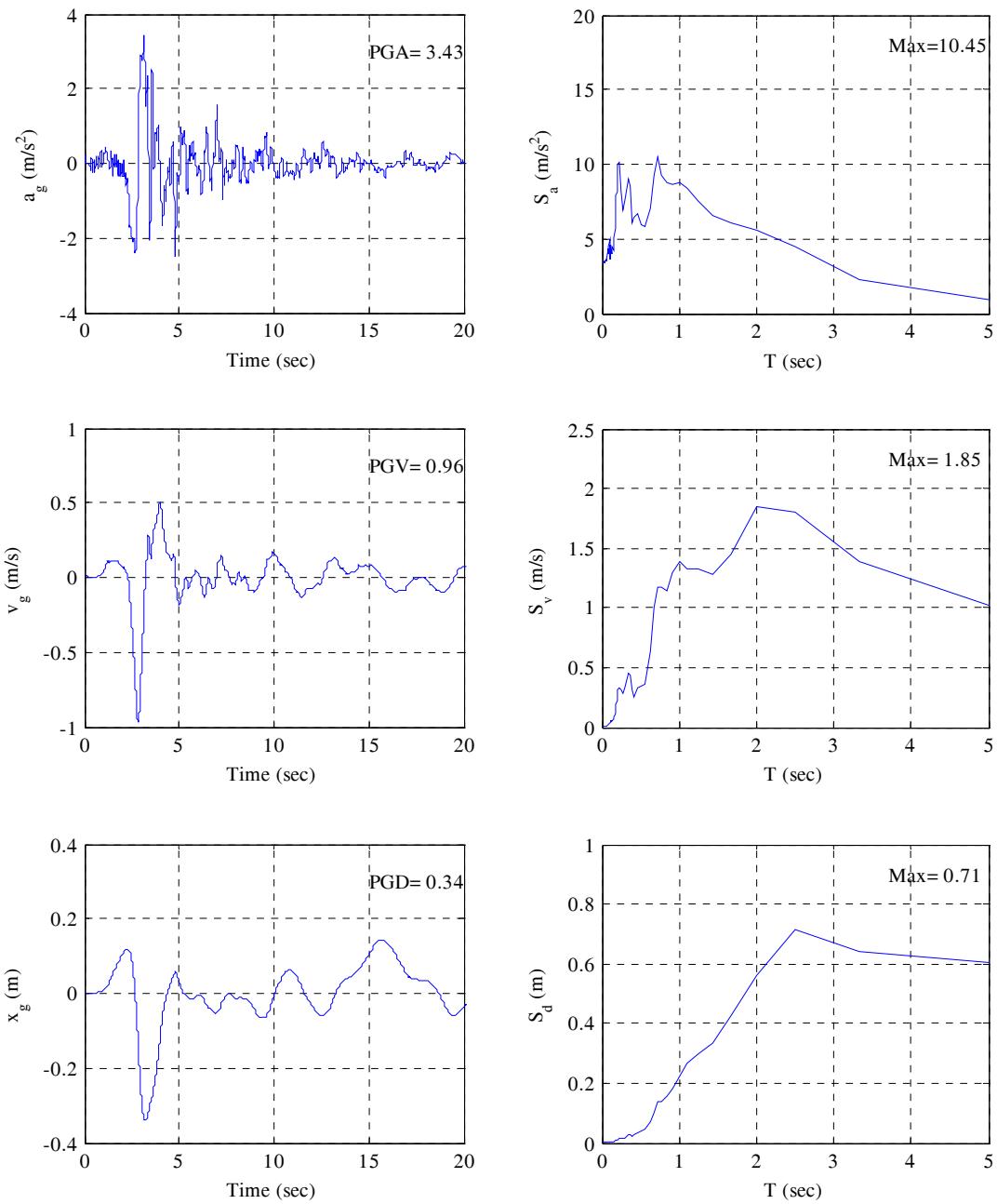
پیوست الف

تاریخچه زمانی و طیف پاسخ
الاستیک زلزله‌های حوزه نزدیک
مطالعه شده

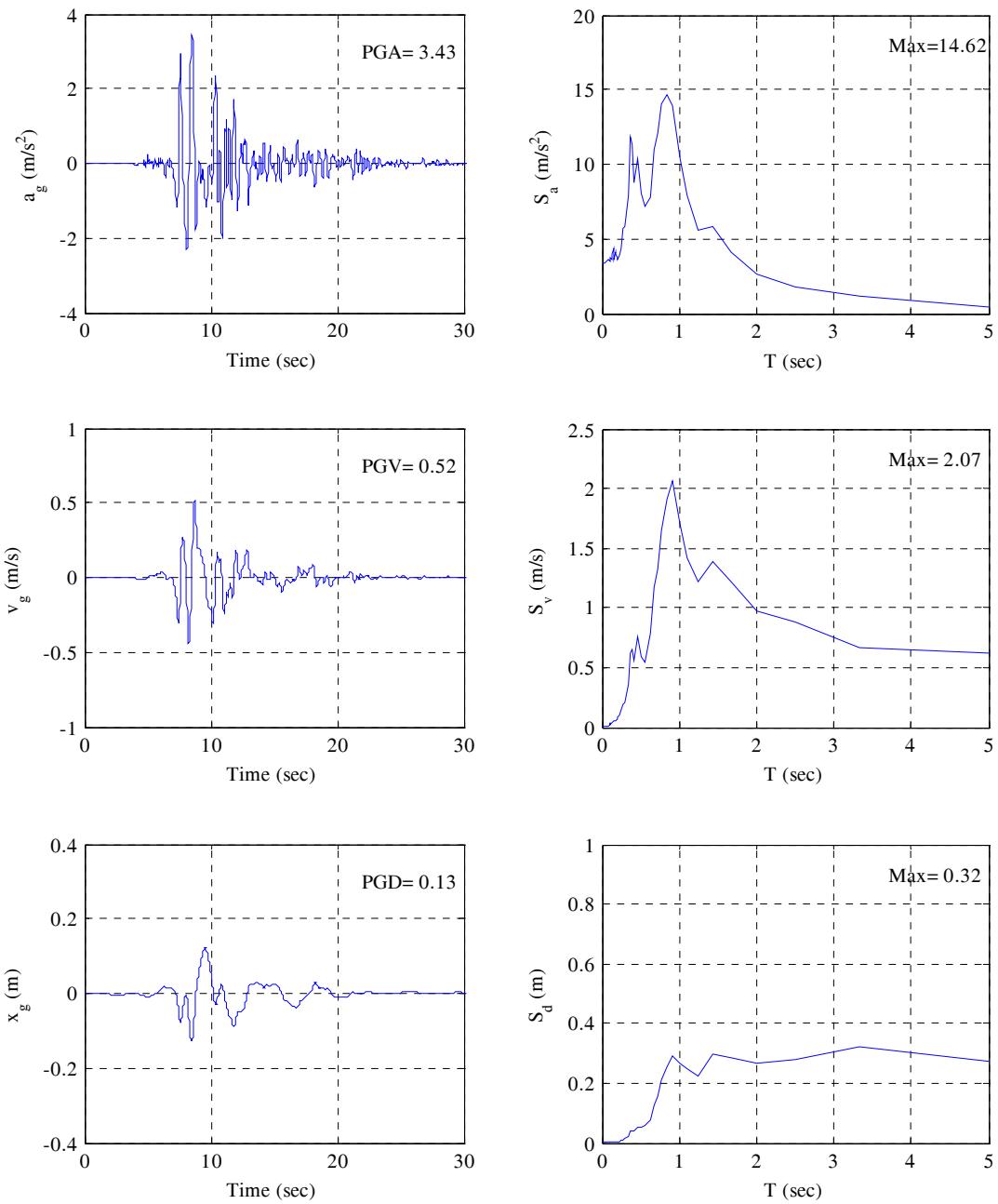
در این ضمیمه تاریخچه زمانی شتاب، سرعت و جابجایی به همراه طیف پاسخ الاستیک زلزله‌های حوزه نزدیک استفاده شده در شبیه‌سازی عددی ارایه شده است. این همان زلزله‌های حوزه نزدیک به کار رفته در پروژه SAC است. PGA کلیه این زلزله‌ها به $g/35$ مقیاس شده و طیف پاسخ الاستیک زلزله‌ها با نسبت میرایی $2\% = \gamma$ ترسیم گردیده است.



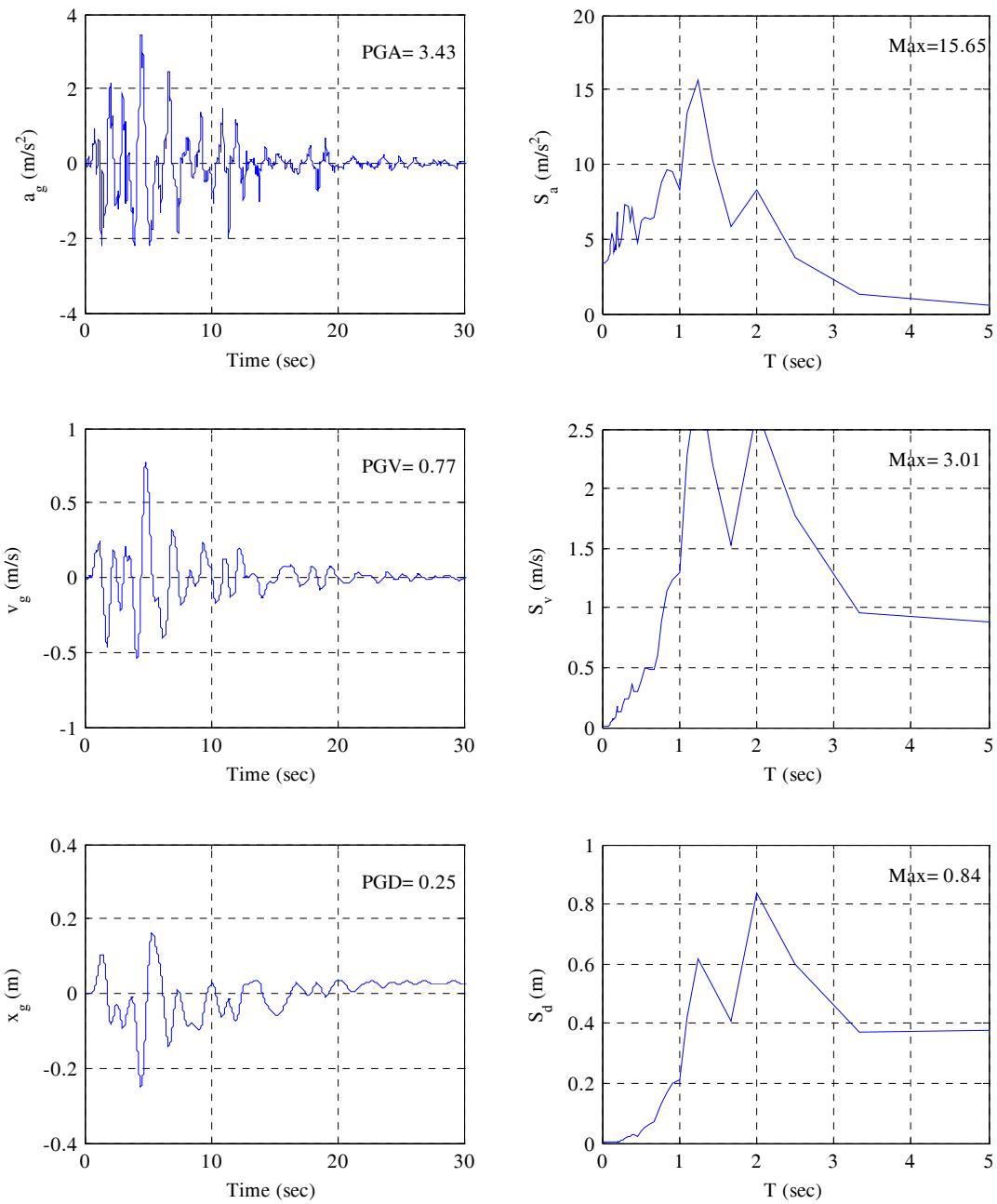
شكل (الف)- ۱ - تاریخچه زمانی و طیف پاسخ شتاب، سرعت و جابجایی
زلزله مندوسینو (۱۹۹۲) ایستگاه پترولیا با میرایی ۵٪



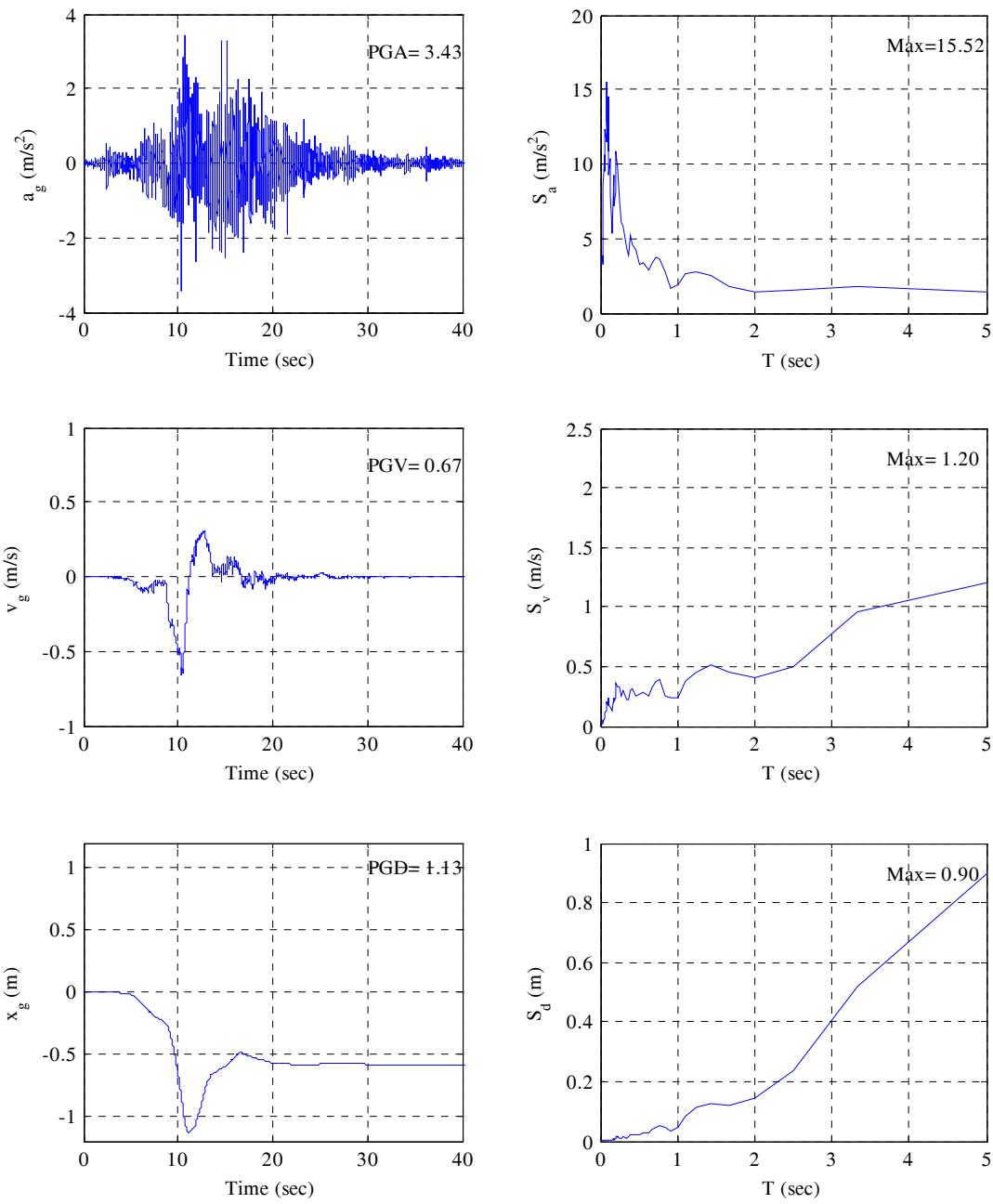
شكل (الف)-۲- تاریخچه زمانی و طیف پاسخ شتاب، سرعت و جابجایی
زلزله ارزینکان (۱۹۹۲) ایستگاه ارزینکان با میرایی٪۲



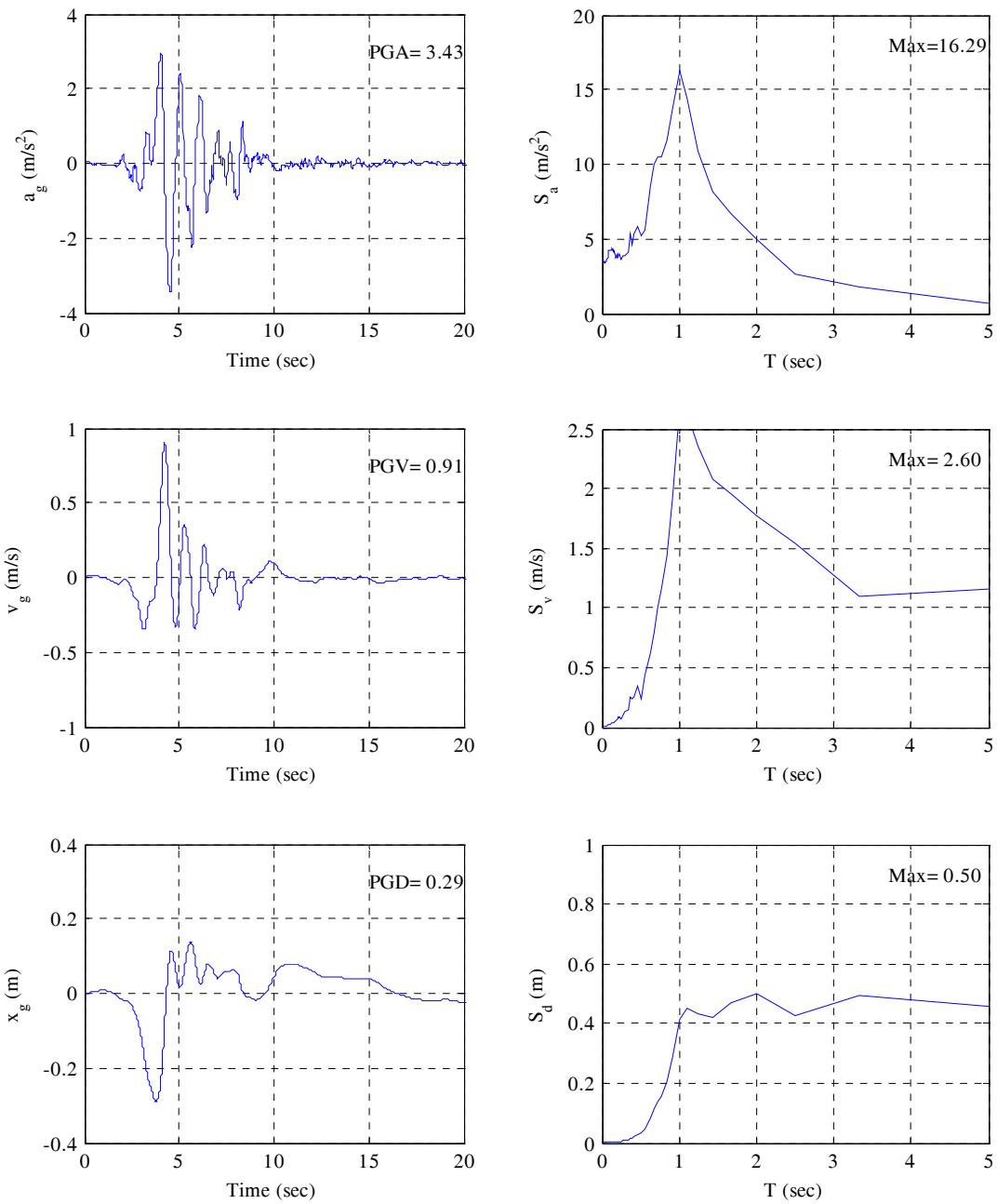
شكل (الف)-۳- تاریخچه زمانی و طیف پاسخ شتاب، سرعت و جابجایی
زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه JMA با میرایی ۰/۲



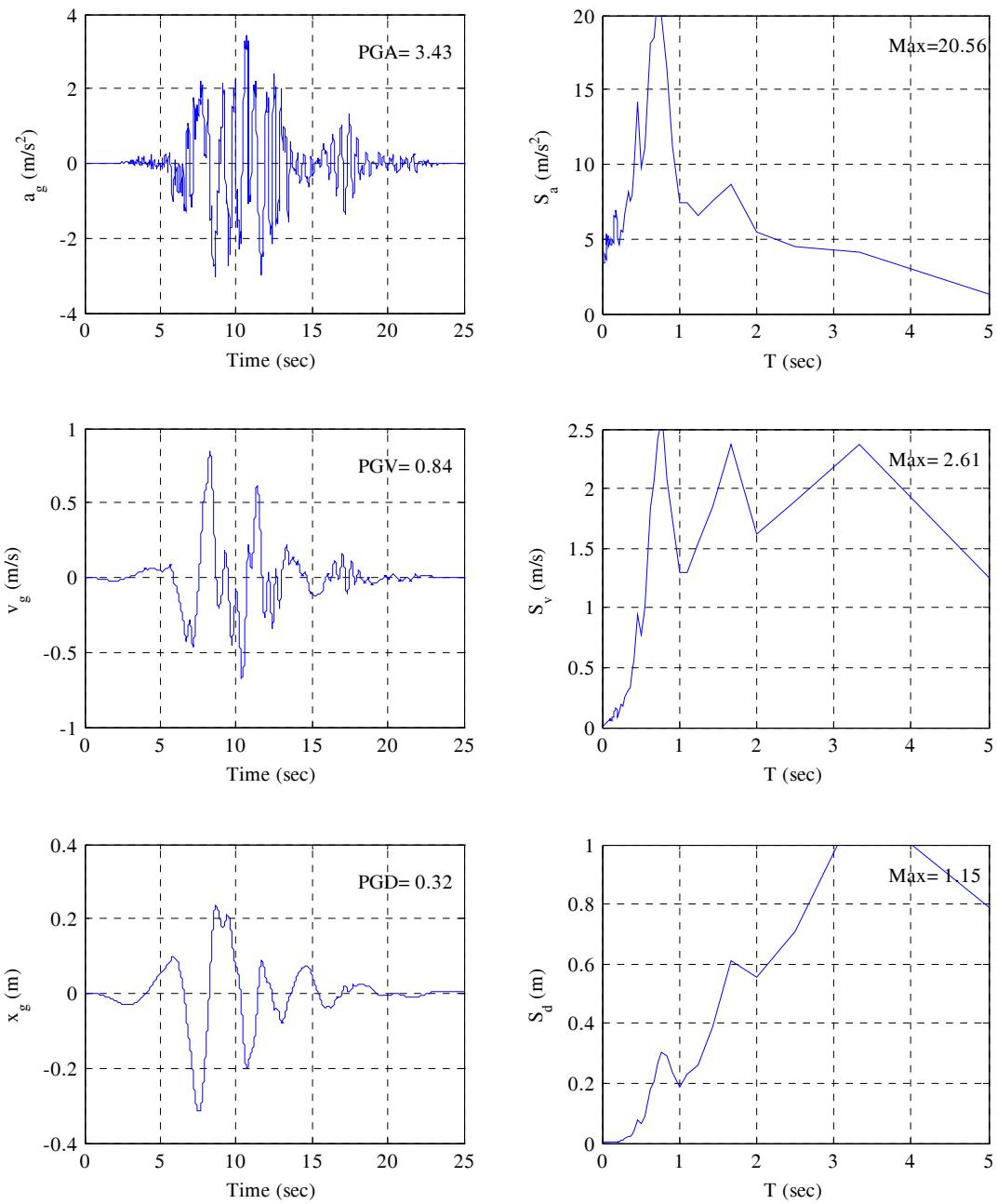
شکل (الف)-۴- تاریخچه زمانی و طیف پاسخ شتاب، سرعت و جابجایی زلزله کوبه (۱۹۹۵) ایستگاه تاکاتوری با میرایی ۲۵٪



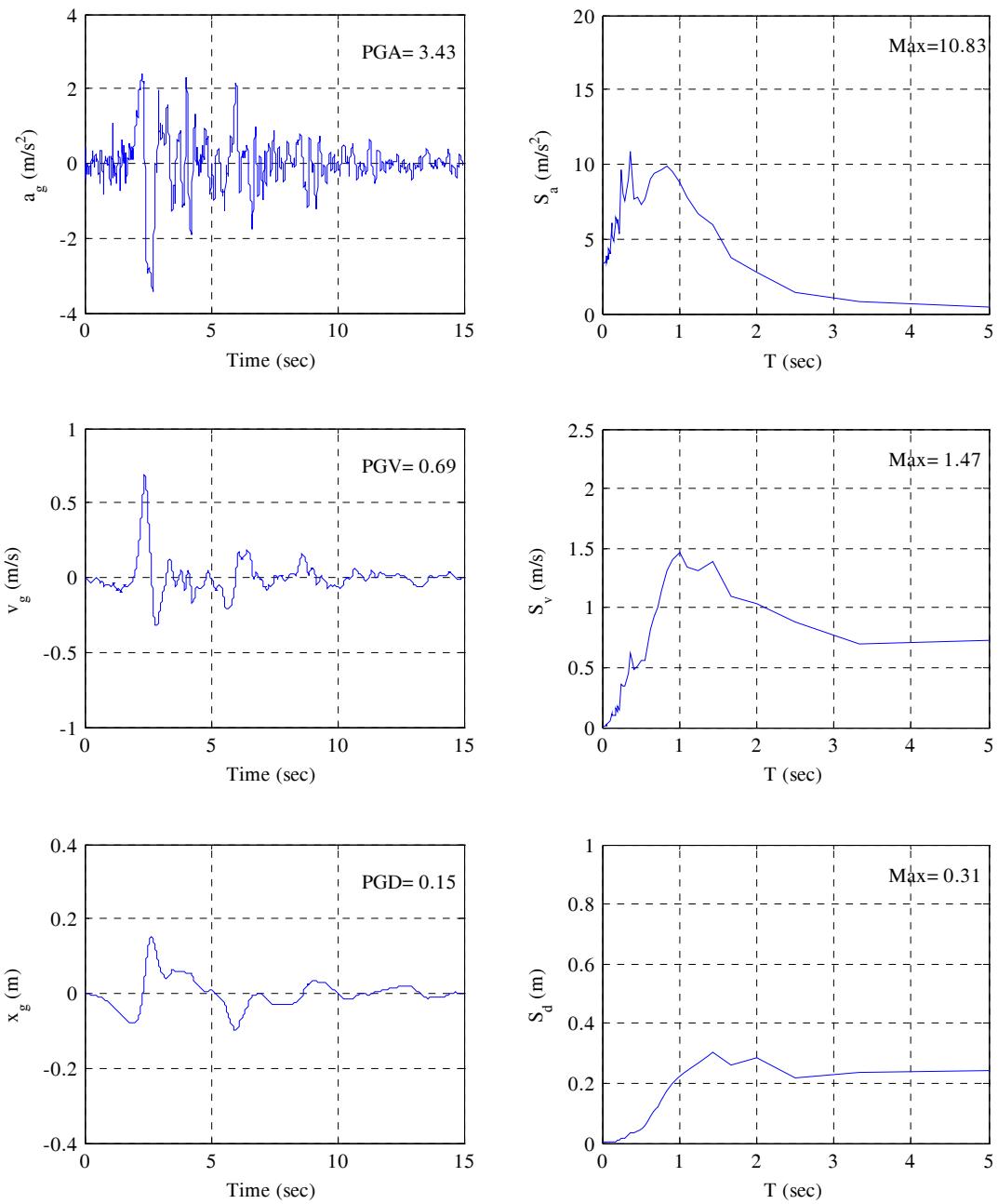
شكل (الف)-۵- تاریخچه زمانی و طیف پاسخ شتاب، سرعت و جابجایی
زلزله لندرز (۱۹۹۲) ایستگاه LASRN با میرایی $\zeta = 0.2$



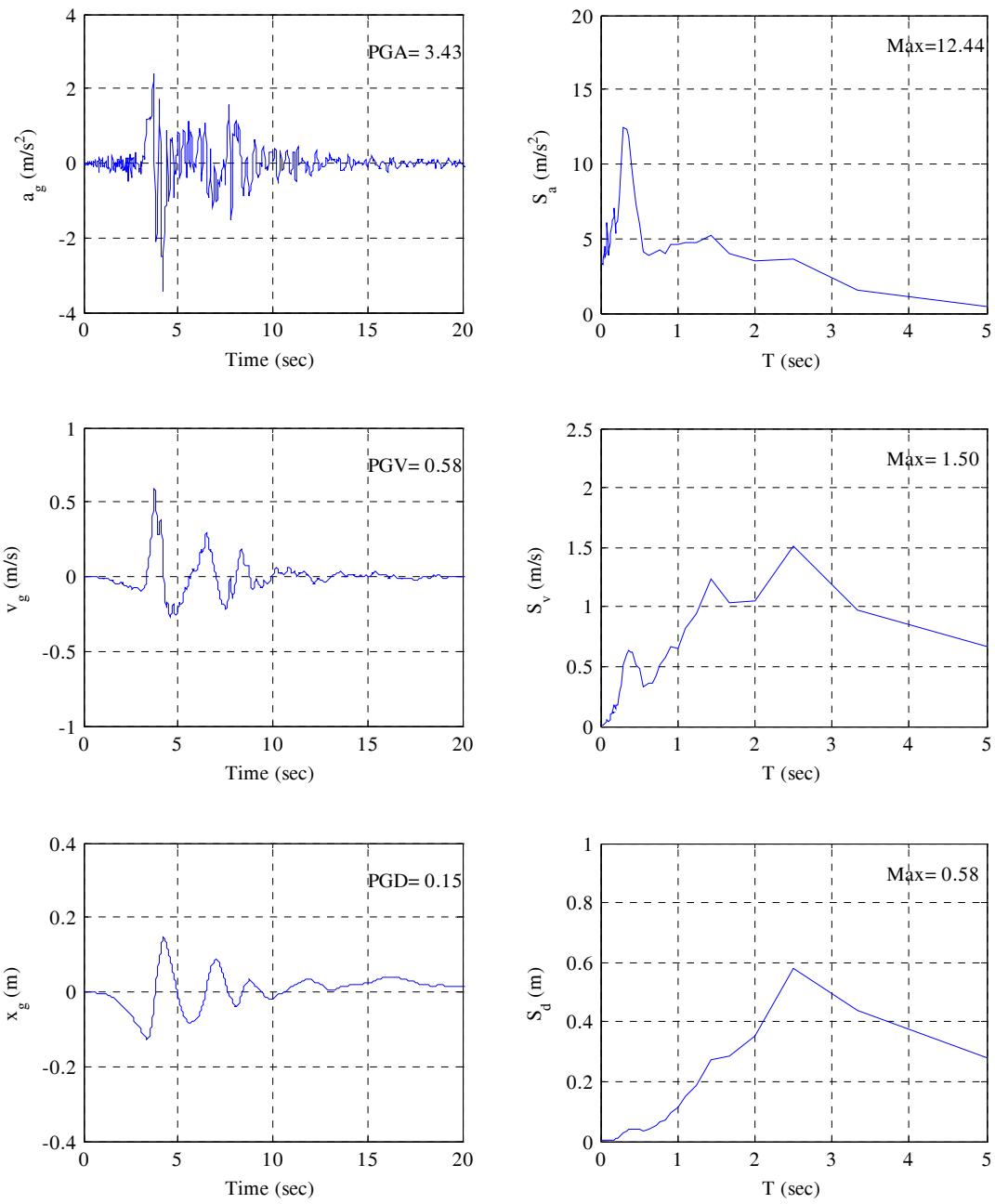
شکل (الف)-۶- تاریخچه زمانی و طیف پاسخ شتاب، سرعت و جابجایی
زلزله لوماپریتا (۱۹۸۹) ایستگاه سد لگزینگتون با میرایی٪۲



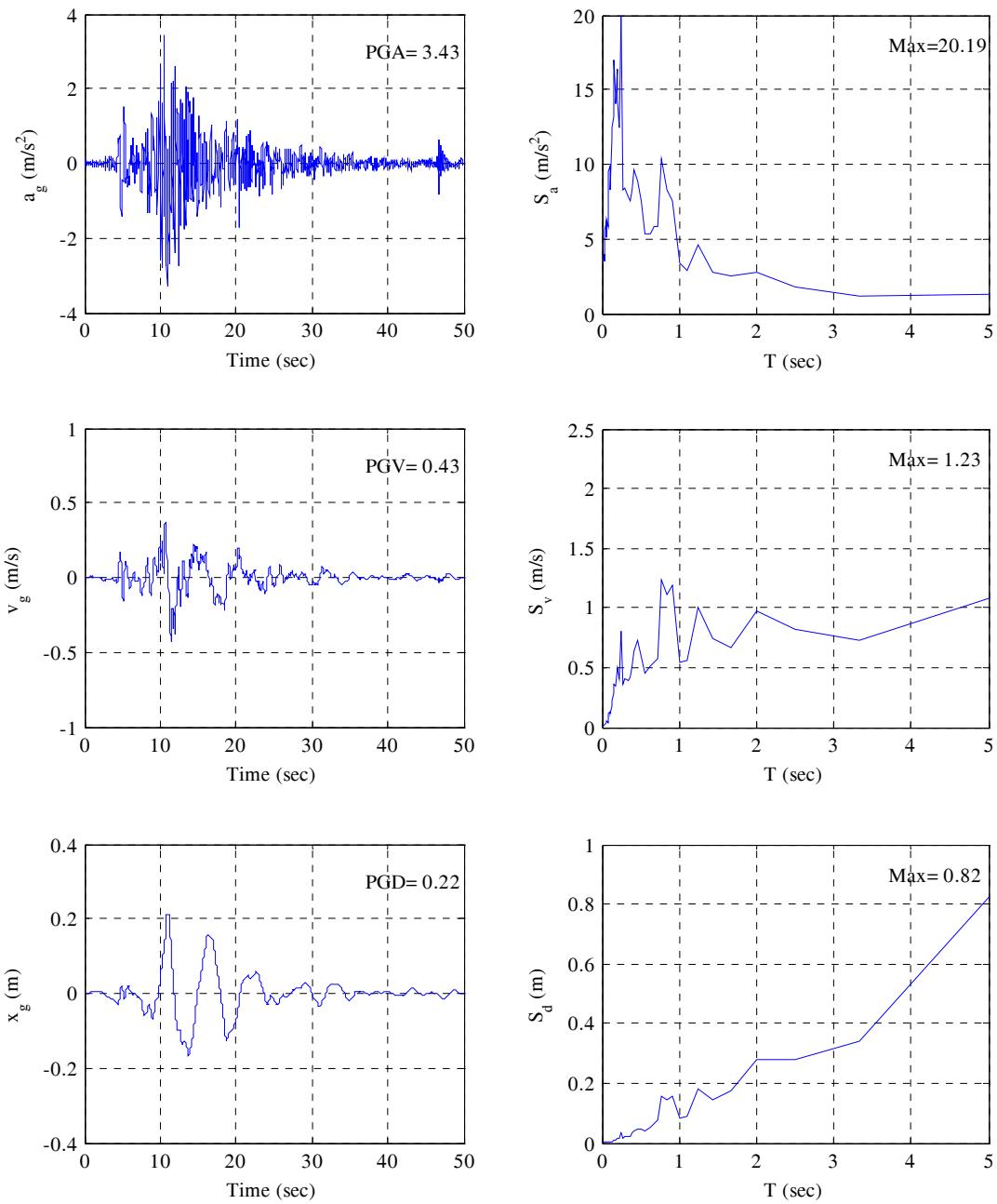
شکل (الف)-۷- تاریخچه زمانی و طیف پاسخ شتاب، سرعت و جابجایی زلزله لوماپریتا (۱۹۸۹) ایستگاه لس گاتوس با میرایی ۲۵٪



شكل (الف)-۸- تاریخچه زمانی و طیف پاسخ شتاب، سرعت و جابجایی
زلزله نورثریدج (۱۹۹۴) ایستگاه رینالدی با میرایی٪۲



شکل (الف)-۹- تاریخچه زمانی و طیف پاسخ شتاب، سرعت و جابجایی
زلزله نورثridج (۱۹۹۴) ایستگاه اولیویو با میرایی ۰٪



شکل (الف)- ۱۰ - تاریخچه زمانی و طیف پاسخ شتاب، سرعت و جابجایی
زلزله طبس (۱۹۷۸) ایستگاه طبس با میرایی $= ۰.۲$

Abstract

Recent near-field earthquakes have shown the vulnerability of structures that have been designed and constructed according to the current seismic codes. Near-Field earthquakes are characterized by high peak ground acceleration and a long period velocity pulse as well as a large ground peak velocity and displacement. Such characteristics are considered responsible for severe damages to buildings and other infrastructures that have been designed according to the current seismic codes. Hence, decreasing of damages to the structures subjected to near-field earthquakes is an important issue for mitigating the human and economic losses.

As an alternative to the conventional structural design, the control systems can be adopted. In this context, semi-active control systems are more promising than passive and active control systems. Since the peak ground acceleration or velocity of the near-field earthquake occurs in the form of a shock, rather than a gradual build-up, current semi-active devices may not dissipate energies quickly enough to prevent a serious damage to structures.

In this research, a new innovative semi-active resettable device by using MR-fluid is introduced, designed and studied for vibration control of structures subjected to near-field earthquakes. The novel device consists of a cylinder-piston system with a control valve and a magneto-rheological valve (MR-valve) mounted on a bypass pipe connecting two sides of the cylinder. The MR-valve is used as energy dissipater in this device. The proposed device can be set by changing the stiffness and the damping of the device independently. In addition, the hysteresis behavior can be changed by using different control logics for control valve. Moreover, by changing the adjustable device parameters, a wide range of stiffness is obtainable.

Two mathematical models i.e., linear and non-linear models were established for the device force-displacement relation. For evaluating the device performance and validating the mathematical models, two prototypes are designed and manufactured. A series of quasi-static and dynamic experiments were conducted at the Structural Dynamics Laboratory of the Hong Kong Polytechnic University. Experimental results confirmed the mathematical models.

Three different control logics are introduced and by numerical simulations, the performance of these methods applied to a single degree of freedom (SDOF) system is studied. The simulation results show that the proposed device reduced input energy level of the SDOF system and the energy dissipation rate is more than an uncontrolled system.

The comprehensive performance of the new device is evaluated by numerical simulations. To this end, the seismic behavior of 5-story, 10-story and 15-story building models, equipped with proposed resettable device, subjected to near-field earthquakes are studied. The study considers three different control methods in reducing response of the building subjected to different near-field earthquakes. Results show the efficiency of proposed devices in controlling seismic response of the buildings. However, each control methods present different advantages based on input near-field earthquake and building characteristics.

Keywords: near-field earthquake; vibration control; semi-active control; resettable device; seismic response; variable stiffness; MR-fluid.



Shahrood University of Technology
Faculty of Civil and Architectural Engineering

Vibration Control of Structures Subjected to Near-Field Earthquakes By Using Resettable Damper

A Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy

Seyed Masoud Sajjadi Alehashem

Supervisor: Dr. Ali Keyhani

September 2012